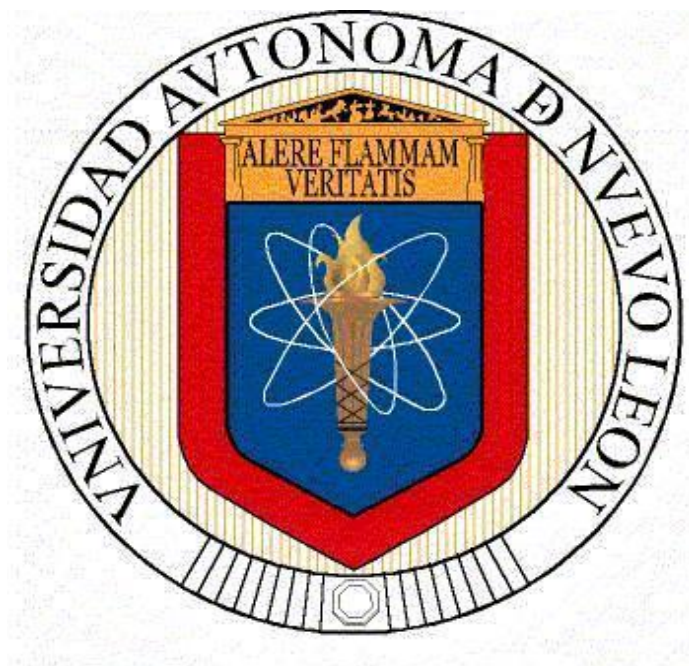


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

**DISEÑO Y DESARROLLO DE SENSORES EN RF
CON METAMATERIALES.**

POR

MARÍA GUADALUPE LUGO MARTÍNEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA.**

MONTERREY NUEVO LEÓN, MÉXICO, ABRIL 2015

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**DISEÑO Y DESARROLLO DE SENSORES EN RF
CON METAMATERIALES.**

**Por
MARÍA GUADALUPE LUGO MARTÍNEZ**

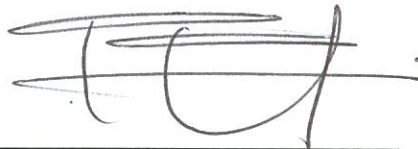
**Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA.**

ABRIL 2015

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Diseño y desarrollo de sensores en RF con metamateriales" realizada por la alumna María Guadalupe Lugo Martinez, con número de matrícula 1385045, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica.

El Comité de Tesis



Dra. Norma Patricia Puente Ramírez
Asesor



Dr. Gustavo Rodríguez Morales
Revisor

Dra. Noemi Lizarraga Osuna
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, marzo 2015

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por darme la sabiduría y el entendimiento para concluir este trabajo de investigación.

A mis padres y mis hermanos quienes me apoyaron todo el tiempo.

A mis asesores, Dr. Gustavo Rodríguez Morales y Dra. Norma Patricia Puente Ramírez, quienes nunca desistieron al enseñarme y orientarme, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A mi novio Alberto quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

A mis amigos y compañeros quienes fueron un gran apoyo emocional durante el tiempo en que escribía esta tesis.

A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VI
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	3
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Resultados esperados.....	5
1.6 Estructura de la tesis.....	5
Capítulo 2 RESONADORES DE ANILLO RANURADO (RAR) Y METAMATERIALES.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Resonadores de Anillo Ranurado complementarios.....	8
2.2.1 Aplicaciones del RAR como un sensor.....	11
2.3 Metamateriales.....	11
2.3.1 Descripción general de un metamaterial.....	12
2.3.2 Aplicaciones de los metamateriales.....	14
2.4 Conclusión.....	15
Capítulo 3 DISEÑO DE GEOMETRÍAS RARs.....	16

3.1	Introducción.....	16
3.2	Geometrías propuestas.....	17
3.3	Análisis del diseño basado en la frecuencia de resonancia.....	17
3.3.1	Dimensiones.....	18
3.4	Geometría cuadrada.....	18
3.5	Geometría circular.....	21
3.6	Geometría triangular.....	23
3.7	Geometría omega.....	25
3.8	Comparación.....	27
3.9	Conclusión.....	28
Capítulo 4 MODELADO DE LOS RESONADORES DE ANILLO		
RANURADO (RAR).....		29
4.1	Introducción.....	29
4.2	El resonador.....	30
4.3	Guía de onda y resonador.....	30
4.4	Método numérico.....	31
4.5	Modelado computacional.....	34
4.5.1	Señal de entrada.....	35
4.5.2	Geometría cuadrada.....	37
4.5.3	Geometría circular.....	38
4.5.4	Geometría triangular.....	39
4.5.5	Geometría omega.....	40
4.6	Análisis de diseño.....	41
4.6.1	Geometría cuadrada.....	41
4.6.2	Geometría circular.....	42

4.6.3 Geometría triangular.....	44
4.6.4 Geometría omega.....	45
4.7 Conclusión.....	47
Capítulo 5 SENSORES BASADOS EN RESONADORES DE ANILLO	
RANURADO.....	48
5.1 Modelo del sensor.....	48
5.2 Descripción general de la permitividad.....	49
5.3 Resultados.....	52
5.3.1 Geometría cuadrada.....	52
5.3.2 Geometría circular.....	54
5.3.3 Geometría triangular.....	55
5.3.4 Geometría omega.....	56
5.4 Comparación entre espesores de capa superior.....	57
5.4.1 Geometría cuadrada.....	57
5.4.1.1 En contacto con nailon.....	57
5.4.1.2 En contacto con porcelana.....	59
5.4.1.3 En contacto con piel.....	60
5.4.2 Geometría circular.....	61
5.4.2.1 En contacto con nailon.....	61
5.4.2.2 En contacto con porcelana.....	62
5.4.2.3 En contacto con piel.....	63
5.4.3 Geometría triangular.....	64
5.4.3.1 En contacto con nailon.....	64
5.4.3.2 En contacto con porcelana.....	65
5.4.3.3 En contacto con piel.....	67

5.4.4 Geometría omega.....	68
5.4.4.1 En contacto con nailon.....	68
5.4.4.2 En contacto con porcelana.....	69
5.4.4.3 En contacto con piel.....	70
5.5 Anexo: Análisis para la comparación.....	71
5.6 Conclusión.....	73
Capítulo 6 ARREGLOS CON RESONADORES DE ANILLO	
RANURADO.....	74
6.1 Arreglos de antenas.....	74
6.2 Arreglos con RAR omega.....	74
6.2.1 Arreglo 1.....	75
6.2.2 Arreglo 2.....	76
6.2.3 Arreglo 3.....	77
6.2.4 Arreglo 4.....	78
6.3 Conclusión.....	78
Capítulo 7 CONCLUSIONES.....	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Dimensiones utilizadas en cada geometría.....	27
Tabla 2	Dimensiones utilizadas en cada geometría.....	47
Tabla 3	Permitividad relativa de distintos materiales comunes.....	51
Tabla 4	Permitividad relativa de la piel a distintas frecuencias.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Estructura compuesta formada por la combinación de materiales entre sí, siendo ésta mejor que la suma de sus individuales.....	2
Figura 2	Estructura fabrica por J. Pendry para la elaboración de un metamaterial.....	7
Figura 3	Fotografía de un LHM (Left Handed Material) fabricado por D. Smith.....	8
Figura 4	Ejemplo de estructura de un RAR.....	9
Figura 5	Circuito equivalente para un RAR.....	9
Figura 6	Materiales dieléctricos según el signo de su permitividad ϵ y permeabilidad μ	12
Figura 7	Índice de Refracción de un metamaterial.....	13
Figura 8	a) Geometría cuadrada; b) Geometría circular; c) Geometría triangular; d) Geometría omega.....	17
Figura 9	Estructura de RAR cuadrado.....	19
Figura 10	Frecuencias de resonancia para un RAR cuadrado.....	20
Figura 11	Estructura de RAR circular.....	21
Figura 12	Frecuencias de resonancia para un RAR circular.....	22

Figura 13	Estructura de RAR triangular.....	23
Figura 14	Frecuencias de resonancia para un RAR triangular.....	25
Figura 15	Estructura de RAR omega.....	25
Figura 16	Frecuencias de resonancia para un RAR omega.....	27
Figura 17	Comparación de las 4 geometrías a utilizar.....	28
Figura 18	a) Geometría cuadrada; b) Geometría circular; c) Geometría triangular; d) Geometría omega. Todas ellas con guía de onda....	29
Figura 19	Resonador de anillo ranurado circular en contacto con la guía de onda.....	30
Figura 20	Celda de Yee, Los componentes del campo E se ubican a mitad de las aristas y los componentes del campo H al centro de las caras.....	32
Figura 21	Entrelazado de los campos E y H en espacio y tiempo en la formulación FDTD.....	34
Figura 22	Campana de Gauss.....	35
Figura 23	Campana de Gauss y su transformada de Fourier para a) $c=0.5$ b) $c=2$	36
Figura 24	Resonador de anillo ranurado cuadrado.....	37
Figura 25	Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR cuadrado.....	38
Figura 26	Resonador de anillo ranurado circular.....	38
Figura 27	Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR circular.....	39
Figura 28	Resonador de anillo ranurado triangular.....	39
Figura 29	Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR triangular.....	40
Figura 30	Resonador de anillo ranurado omega.....	40
Figura 31	Frecuencias de resonancia de Reflexión y Transmisión para un RAR omega.....	41
Figura 32	Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del	

	RAR cuadrado. La línea discontinua representa el cálculo teórico.....	42
Figura 33	Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR circular. La línea discontinua representa el cálculo teórico.....	43
Figura 34	Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR triangular. La línea discontinua representa el cálculo teórico.....	44
Figura 35	Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR omega. La línea discontinua representa el cálculo teórico.....	45
Figura 36	Distribución de los campos en la sección transversal del RAR.....	46
Figura 37	Estructura de RAR circular en contacto con otro medio.....	49
Figura 38	Comparación de reflexión de estructura de RAR cuadrada. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	53
Figura 39	Comparación de transmisión de estructura de RAR cuadrada. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	53
Figura 40	Comparación de reflexión de estructura de RAR circular. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	54
Figura 41	Comparación de transmisión de estructura de RAR circular. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	54
Figura 42	Comparación de reflexión de estructura de RAR triangular. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	55
Figura 43	Comparación de transmisión de estructura de RAR triangular. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	56
Figura 44	Comparación de reflexión de estructura de RAR omega. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	56
Figura 45	Comparación de transmisión de estructura de RAR omega. $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel).....	57
Figura 46	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de	

	RAR cuadrado en contacto con nailon con distinto espesor.....	58
Figura 47	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR cuadrado en contacto con porcelana con distinto espesor...	59
Figura 48	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR cuadrado en contacto con piel con distinto espesor.....	60
Figura 49	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR circular en contacto con nailon con distinto espesor.....	61
Figura 50	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR circular en contacto con porcelana con distinto espesor.....	62
Figura 51	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de estructura de RAR circular en contacto con piel con distinto espesor.....	64
Figura 52	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con nailon con distinto espesor.....	65
Figura 53	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con porcelana con distinto espesor...	66
Figura 54	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con piel con distinto espesor.....	67
Figura 55	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con nailon con distinto espesor.....	68
Figura 56	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con porcelana con distinto espesor.....	69
Figura 57	Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con piel con distinto espesor.....	70
Figura 58	Arreglo 1 de Resonador de Anillo Ranurado Omega.....	75
Figura 59	Arreglo 2 de Resonador de Anillo Ranurado Omega.....	76
Figura 60	Arreglo 3 de Resonador de Anillo Ranurado Omega.....	77
Figura 61	Arreglo 4 de Resonador de Anillo Ranurado Omega.....	78

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años de investigación se han podido realizar estructuras y/o dispositivos con metamateriales en áreas como la óptica [1], sistemas de comunicaciones [2] (radiofrecuencia, microondas, etc) e incluso en la medicina [3] entre otros, aportando a éstas resultados con mayor resolución y precisión.

En el año de 1968 se presentó por primera vez el concepto de metamaterial por el físico ruso Víctor Veselago [4], quien propuso la fabricación de materiales cuya permitividad (ϵ) y permeabilidad (μ) fueran simultáneamente negativos, lo que generaría un índice de refracción negativo.

No obstante fue a partir del año 1999 en que se pudo demostrar experimentalmente la teoría anterior, cuando el físico inglés John Pendry pudo fabricar una estructura que exhibía una permeabilidad magnética efectiva que puede ser ajustada a valores no accesibles en la naturaleza, es decir, valores negativos [5]. Un año más tarde obtuvo los llamados “superlentes” los cuales tienen mayor resolución, ya que esta nueva versión posee un índice de refracción negativo [6].

En el año 2001, el físico estadounidense David Smith creó una estructura con la cual consiguió, de manera experimental, un índice de refracción negativo en frecuencias de microondas. Dicha estructura está formada por un arreglo periódico de celdas unitarias de tiras de cobre y resonadores de anillo ranurado, obteniendo así propiedades que no es posible obtener en materiales naturales [7].

Ambos científicos, J. Pendry y D. Smith, pueden ser considerados como los primeros en obtener datos experimentales a partir de la teoría de Veselago; cabe mencionar que realizaron algunas investigaciones en conjunto como lo fue la refracción negativa en ondas electromagnéticas [8].

A partir de estos descubrimientos se han realizado diversas investigaciones sobre las propiedades y usos que se le pueden dar a estos materiales para el mejoramiento de la ciencia y la tecnología; y se podría deducir que lo importante no es el crear materiales compuestos para generar un índice de refracción negativo sino el poder diseñar materiales compuestos que permitan obtener una permitividad y una permeabilidad del valor deseado.

Para la realización de este proyecto de tesis será necesario hacer uso de materiales compuestos, también conocidos como *composites*, los cuales se forman a partir de dos o más constituyentes de materiales con distintas propiedades físicas, químicas o, en nuestro caso electromagnéticas, que al ser combinados producen un material con características distintas a las que poseen sus componentes de manera individual.

Cada uno de los elementos se mantiene separado dentro de la estructura acabada. Este nuevo material puede ser preferido ya que puede ser más fuerte, más ligero o más económico en comparación con los materiales tradicionales.

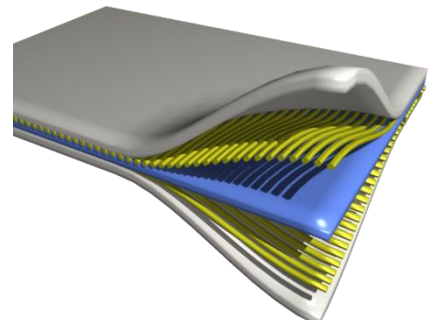


Figura 1. Estructura compuesta formada por la combinación de materiales entre sí, siendo ésta mejor que la suma de sus individuales.

Una de las ventajas que poseen los materiales compuestos es que al hacer la combinación de los materiales adecuados se producirá una eficiencia en las propiedades de los materiales, lo que ayuda a la obtención de distintas características en su estructura general, lo que permite su adaptación para la aplicación que se quiera generar.

Un ejemplo de este tipo de estructuras son los llamados *metamateriales*

Un *metamaterial* está compuesto por materiales que en conjunto poseen una permitividad y permeabilidad negativas lo que lo hace una estructura única y no puede encontrarse como tal en materiales de la naturaleza.

Recientemente se han realizado investigaciones de los metamateriales para aplicaciones en sensado (2010) [9], para la realización de antenas que poseen patrones de radiación omnidireccional (2012) [10] e incluso para la fabricación de Biosensores capaces de detectar el cáncer (2011) [11].

En esta tesis se presenta un análisis, tanto teórico como modelado computacional, de resonadores de anillo ranurado con metamateriales como sensores en un rango de radiofrecuencia utilizando cuatro distintas geometrías que nos permitirán conocer el desempeño de cada uno de ellos.

1.1 Motivación

A lo largo de los últimos años ha existido un gran crecimiento en la investigación y aplicaciones que se han realizado con metamateriales.

Es por eso que la motivación principal para realizar este trabajo de tesis es el diseñar elementos de estructuras de metamateriales para el desarrollo de sensores electromagnéticos más eficientes.

1.2 Descripción del problema

Un factor importante en la elección de una estructura de metamaterial es su capacidad de resonancia en el rango de radiofrecuencia.

El uso de los metamateriales permitirá experimentar con las propiedades de propagación de las ondas electromagnéticas en el material de tal forma que se resalten las características importantes en los sensores, tales como la sensibilidad, la precisión y la resolución.

1.3 Objetivos

- *Objetivo General.*

Diseño y/o desarrollo de sensores para controlar la emisión de radiación en cuanto a su intensidad, direccionalidad y recepción.

- *Objetivos Particulares.*

- **Objetivo 1:** Diseño teórico de los elementos, sensores y/o emisores de radiación, estableciendo las características requeridas en cuanto a la permeabilidad magnética (μ) y permitividad eléctrica (ϵ) para configuraciones donde sea prioritaria la direccionalidad y la detección de radiación.

- **Objetivo 2:** Modelado del diseño teórico para caracterizar su desempeño en las diferentes configuraciones obtenidas en la etapa teórica, optimización de los sistemas en cada configuración y selección de la más eficiente.

- **Objetivo 3:** Implementación numérica para un arreglo en cascada basado en el diseño sobresaliente, resultado del estudio teórico y del modelado.

1.4 Hipótesis

El diseño y construcción de estructuras en meta-materiales con respuesta electromagnética en la región de radiofrecuencia nos permitirá generar aplicaciones para la metrología industrial, biometría, diagnóstico médico, así como en sistemas de comunicación.

1.5 Resultados esperados

Gracias al estudio realizado a cada una de las geometrías que a continuación se presentan será posible conocer:

- El desempeño de cada una de las estructuras.
- Las características de cada uno de los elementos necesarios para la obtención de las frecuencias deseadas.

Y a partir de eso

- Realizar un arreglo en cascada con la geometría que mejor respuesta presente para de este modo obtener un sensor más sensible a las frecuencias.

1.6 Estructura de la tesis

La presentación de este proyecto de tesis se divide en 7 capítulos, a través de los cuales se estudiarán los conceptos teóricos necesarios para su realización. La estructura por capítulos es la siguiente:

- **Capítulo 1.-** Se presenta la introducción del proyecto, así como la descripción del problema, los objetivos por alcanzar, la hipótesis planteada y los resultados esperados con la realización del mismo.
- **Capítulo 2.-** Se realiza la descripción de los resonadores de anillo ranurado así como de los metamateriales, los cuales serán una parte importante para la realización de este proyecto.
- **Capítulo 3.-** Se obtiene el diseño de las geometrías que serán empleadas a lo largo de este trabajo; se presentan las propiedades necesarias en cada una de las geometrías.
- **Capítulo 4.-** A partir de los resultados del capítulo anterior, se obtiene el modelado computacional de cada una de las geometrías estudiadas estando en contacto con una señal conocida para obtener sus respuestas.

- **Capítulo 5.-** Se obtiene un modelado computacional de los resonadores de anillo ranurado en combinación con un medio de distinta constante dieléctrica, esto con el fin de simular el sensor en contacto con una superficie.
- **Capítulo 6.-** Se presenta una implementación numérica de una estructura en cascada realizada con la geometría más eficiente de acuerdo a los resultados obtenidos en los capítulos anteriores.
- **Capítulo 7.-** Se finaliza este trabajo con las conclusiones generales de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

Capítulo 2

RESONADORES DE ANILLO RANURADO (RAR) Y METAMATERIALES

2.1 Introducción

En el año de 1946 surgieron las primeras investigaciones sobre la resonancia magnética. Fueron los científicos estadounidenses, Edward M. Purcell [12] y Félix Bloch [13], quienes de manera independiente demostraron que ciertos núcleos de materiales sólidos en contacto con un campo magnético pueden absorber energía de radiofrecuencia y generar una señal de radiofrecuencia capaz de ser captada por una antena.



Figura 2. Estructura fabrica por J. Pendry para la elaboración de un metamaterial.

Gracias a estos descubrimientos en 1999 el físico John Pendry [5] demostró en su trabajo que a partir de estructuras no magnéticas acomodadas periódicamente, sería posible conseguir una estructura unificada que presenta una permeabilidad magnética efectiva. Su trabajo consistió en la combinación de RARs y cilindros de metal como se muestra en la figura 2, los cuales en conjunto presentan valores negativos de permeabilidad (μ) y permitividad (ϵ). Éstos son ahora conocidos como *metamateriales*.

Más tarde, en el año 2001, el físico David Smith [7] hizo uso también de los RARs para obtener una estructura cuyo índice de refracción resulta negativo, lo cual es una característica de los metamateriales.

En ese trabajo se realizó una matriz de dos dimensiones de tiras de cobre y resonadores en un arreglo periódico sobre tiras de material de una placa de circuito común, como se muestra en la figura 3.

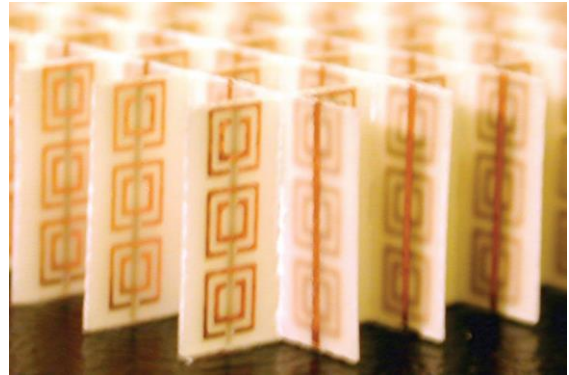


Figura 3. Fotografía de un LHM (Left Handed Material) fabricado por D. Smith.

Gracias a los experimentos de investigación realizadas por J. Pendry y D. Smith fue posible construir estructuras que poseen propiedades electromagnéticas no naturales, es decir, los *metamateriales* que V. Veselago [4] dedujo en el año de 1968.

2.2 Resonadores de Anillo Ranurado complementarios

La resonancia es un fenómeno que se produce en un circuito que posee elementos reactivos (capacitancia C e inductancia L) que cuando se encuentran en contacto de una corriente a determinada frecuencia ésta hará que la reactancia se anule en caso de que ambos elementos se encuentren en serie, o en caso contrario, se tendrá una reactancia infinita si se encuentran en paralelo. Para que exista una resonancia tiene que cumplirse que tanto inductancia como capacitancia sean iguales, en este caso la impedancia Z se reduce a una resistencia pura.

Entonces un resonador es cualquier dispositivo o sistema capaz de estar en resonancia o que tiene la capacidad de comportarse de manera resonante, es decir, que al aplicarle una onda electromagnética éstas oscilan dentro del

resonador a determinadas frecuencias con una amplitud más grande en comparación con las demás.

Los Resonadores de Anillo Ranurado [14], RAR, están formados por uno o más anillos de metal no ferromagnético (por ejemplo el cobre) separados por un sustrato dieléctrico, donde cada uno de los anillos presenta una ranura colocada en lados opuestos como se ilustra en la figura 4. Si a esta estructura se le aplica un campo magnético perpendicular al plano de la misma ocurrirá un flujo de corriente dentro de los anillos lo cual lo hará actuar como un inductor, y del mismo modo el dieléctrico entre los anillos y las ranuras permitirán generar una capacitancia equivalente para el RAR. De este modo el circuito equivalente para el RAR es un circuito LC en paralelo [figura 5].

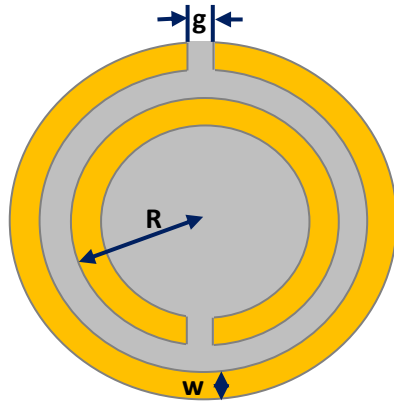


Figura 4. Ejemplo de estructura de un RAR.

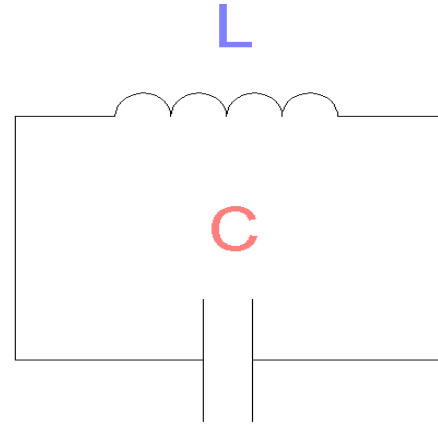


Figura 5. Circuito equivalente para un RAR.

En un circuito LC paralelo la impedancia del conjunto será la combinación de las impedancias de C y L [15]:

$$Z_p = \frac{j \cdot Lw \cdot \frac{1}{jwC}}{j \cdot Lw + \frac{1}{jwC}} = \frac{j \cdot Lw}{1 - w^2LC} = j \frac{Lw}{1 - w^2LC} = jX_p \quad (1)$$

Siendo X_p la reactancia del conjunto:

$$X_p = \frac{Lw}{1 - w^2LC} \quad (2)$$

X_p tendrá comportamientos diferentes dependiendo del valor que w adquiera:

$$w = 0 ; X_p = 0$$

$$w < w_0 ; X_p > 0 \quad \text{Comportamiento Inductivo}$$

$$w_0^2 LC = 1 ; X_p = \infty$$

$$w > w_0 ; X_p < 0 \quad \text{Comportamiento Capacitivo}$$

$$w = \infty ; X_p = 0$$

De donde se obtiene:

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

A partir de esto la **frecuencia de resonancia** correspondiente será:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Donde L representa la inductancia y C la capacitancia internas generadas por el resonador, las cuales al estar en combinación permiten que exista una sola frecuencia de resonancia.

Un ejemplo de esto se observa al sintonizar un canal de televisión o de radiodifusión, ya que al modificar la combinación LC (inductancia-capacitancia) se selecciona la frecuencia deseada y descarta todas las demás.

La energía que mantenga el RAR dentro de su estructura dependerá de la geometría y dimensiones que éste posea, ya que cuando el tamaño del cuerpo que intercepta la onda se aproxima al de la longitud de onda se absorbe la energía máxima, es decir, a mayor tamaño menor frecuencia resonante.

En este trabajo de tesis serán empleadas estas características de los RARs los cuales se sintonizan a las frecuencias requeridas por las aplicaciones.

2.2.1 Aplicaciones del RAR como un sensor

Debido a las características extraordinarias que muestran los metamateriales es posible crear sensores en distintas ramas de estudio. Se han realizado algunas aplicaciones para el área médica, por ejemplo, sensores para la detección del cáncer, sensores para la obtención de imágenes médicas con mayor resolución; del mismo modo se han utilizado para la formación de antenas, ya sea fija o móvil [1] [2].

A lo largo de los años de investigación se han desarrollado biosensores con metamateriales, los cuales son esenciales en distintas áreas tales como el diagnóstico de enfermedades, vigilancia del medio ambiente o como herramientas en la investigación de los fenómenos biológicos. Se ha demostrado que este tipo de biosensores tienen gran utilidad en la proyección de imágenes y en la detección de moléculas en el interior de las células vivas [3]. De acuerdo a la frecuencia en que funcione la biomolécula a detectar y el componente metamaterial será como se clasifiquen los Biosensores (de microondas, de terahertz, plasmónica) [1], un ejemplo de esto es la realización de un biosensor de RAR plano basado en RF desarrollado para la detección libre de biomoléculas de cáncer de próstata [16].

En esta sección se abordará la descripción, aplicaciones y ventajas de los metamateriales para su mejor comprensión.

2.3 Metamateriales

En la última década, el interés por los metamateriales ha ido en aumento debido a las propiedades inusuales que presenta. El término *metamaterial* se asocia a una estructura o medio artificial que, en un determinado rango de frecuencias, presenta propiedades electromagnéticas atípicas que podrían ser utilizadas en una gran variedad de aplicaciones ópticas y de microondas.

2.3.1 Descripción general de un metamaterial

Un *metamaterial*, también conocido como material izquierdo (LHM, Left Handed Material), es un material artificial creado por la combinación periódica de un metal y un dieléctrico, el cual posee propiedades electromagnéticas que no son posibles encontrar en medios naturales.

Las características electromagnéticas de los *metamateriales* se han utilizado en el diseño de nuevas aplicaciones y dispositivos que han permitido mejorar los resultados obtenidos.

Estas características son:

- Permitividad Eléctrica (ϵ) y Permeabilidad Magnética (μ) Negativas.
de las cuales se obtendrán:
 - Ley de Snell Inversa.
 - Índice de Refracción Negativo.
 - Efecto Doppler Inverso.

Para conocer los materiales que poseen este tipo de características, se presenta el siguiente sistema de coordenadas que presenta los diferentes grupos de dieléctricos dependiendo del signo de las partes reales de su permitividad y su permeabilidad [17].

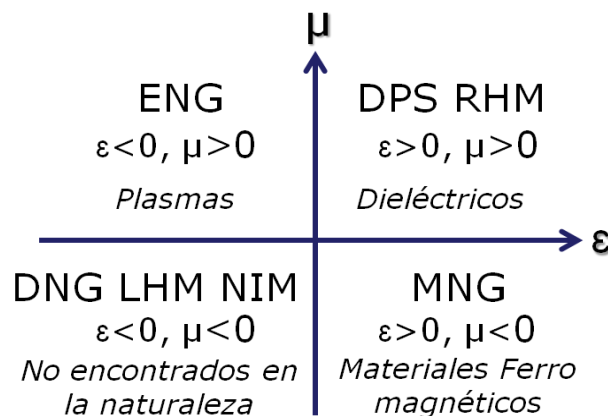


Figura 6.- Materiales dieléctricos según el signo de su permitividad ϵ y permeabilidad μ .

Los materiales dieléctricos convencionales, que existen en la naturaleza, se ubican en el primer cuadrante y se caracterizan por poseer tanto permitividad como permeabilidad positivos. Éstos son conocidos como materiales DPS (Double PoSitive) o RHM (Right-Handed Media).

Por otro lado, los materiales en los que la permitividad y/o permeabilidad pueden adquirir valores negativos se ubican en el segundo y cuarto cuadrante respectivamente en los que solo la permitividad (ENG, Epsilon NeGative) o la permeabilidad (MNG, Mu NeGative) son negativos.

Por último los materiales que actualmente son objeto de un estudio más riguroso son los pertenecientes al tercer cuadrante, ya que se caracterizan por poseer tanto permitividad como permeabilidad simultáneamente negativas, son llamados materiales DNG (Double NeGative), LHM (Left-Handed Media) o NIM (Negative Index Media).

La permitividad (ϵ) y la permabilidad (μ) de un material se relacionan con el índice de refracción por medio de la siguiente expresión:

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (5)$$

Tomando en cuenta los materiales del tercer cuadrante del sistema de coordenadas anterior, donde la permitividad y la permeabilidad son negativos, entonces el índice de refracción que obtendremos será negativo.

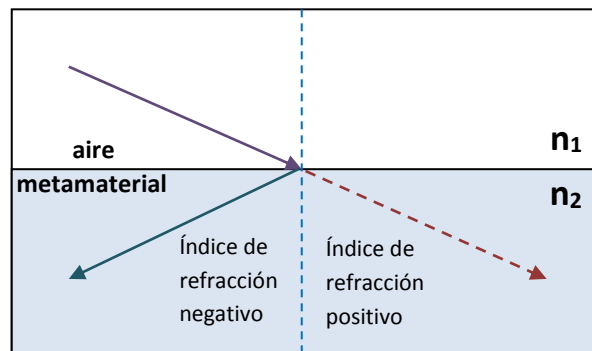


Figura 7.- Índice de Refracción de un metamaterial

2.3.2 Aplicaciones de los metamateriales

La tendencia en la aplicación de estos materiales está enfocada en áreas como telecomunicaciones, óptica, sensado químico, biomédica, entre otros.

Entre las diversas aplicaciones que se han realizado con la utilización de los metamateriales se encuentran, por ejemplo:

- Antena omnidireccional de alta ganancia fabricada a partir de una estructura dentrificada con una permeabilidad negativa que es empleada como sustrato para mejorar la ganancia de una antena de alimentación convencional, mejorando cerca de 2.2dB y obteniendo una mejora del 38% en la eficiencia. Es utilizada para mejorar la confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas [18].
- Antena con frecuencia de barrido de patrón de radiación omnidireccional, fue creada como base de una línea de transmisión de 2D, hecha de resonadores complementarios de anillo ranurado y brecha capacitiva. Estas estructuras son adaptadas principalmente a líneas de transmisión de 2D, que al estar agrupadas pueden ser utilizadas en aplicaciones de imagen y superación del límite de difracción. Dependiendo del arreglo que se realice con la estructura serán las ganancias que se puedan obtener con ellas, por ejemplo, al hacer un arreglo de 5X1 se obtendrá una ganancia de 8.4dB y en cambio para un arreglo de 3X3 tendremos una ganancia de 4.23dB. En ambos casos la antena es de bajo perfil y es fácil de adaptar a otros dispositivos [10].
- Antenas para teléfonos móviles. El primer dispositivo de este tipo en emplear una antena basada en metamateriales fue el modelo BL40 de la marca LG, el tamaño de la antena con esta tecnología se redujo una quinta parte en comparación de las antenas impresas convencionales [2].

- Lente de metamaterial en combinación de una bobina de superficie para obtener imágenes de Resonancia Magnética. Ésta lente manipula el campo de RF detectado por la bobina, de modo que la sensibilidad de la bobina y la localización espacial del objeto a “escanear” se mejora sustancialmente [3].

Algunas de las ventajas que proporcionan los metamateriales son:

- Sus propiedades no se encuentran presentes en materiales de la naturaleza.
- Como el índice de refracción del metamaterial resulta ser negativo se pueden fabricar lentes planas con una resolución mucho mayor que la de los materiales convencionales.
- Las propiedades únicas que posee le permiten crear dispositivos más sensibles.

2.4 Conclusión

En este capítulo se han mostrado los principios básicos de los RARs los cuales son necesarios para la comprensión de este trabajo de tesis.

El uso de metamateriales en los diversos dispositivos mencionados anteriormente ha brindado una mayor sensibilidad y por lo tanto una mejoría en los resultados obtenidos.

El utilizar los RARs con metamateriales tiene la ventaja de proporcionar dispositivos de menores dimensiones, lo que los hace más factibles a la integración con otros sistemas o dispositivos.

Capítulo 3

DISEÑO DE GEOMETRÍAS DE RARs

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan los distintos diseños con los que se trabajará en este proyecto.

Se abordará cada uno de los diseños al calcular la frecuencia de resonancia para cada configuración.

El definir las características para el diseño del RAR nos permitirá obtener el modelo que mejor se ajuste a nuestras necesidades, es decir, el que tenga mejor respuesta a la frecuencia deseada.

Los parámetros a considerar en este proyecto son:

- Frecuencia de resonancia.
- Dimensiones de la estructura
- Propiedades electromagnéticas.
- Respuesta a diferentes materiales.

El fenómeno de resonancia se da gracias a la configuración de las características de inductancia (L) y capacitancia (C), en donde sobresale alguna frecuencia de operación la cual es conocida como *frecuencia de resonancia*.

Para las estructuras que se emplean en este trabajo será necesario conocer la permeabilidad (μ) y la permitividad (ϵ) que poseen, ya que éstos influyen en la respuesta que genere el RAR. En el caso de ausencia de material (vacío) estas cantidades son $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la permitividad y la permeabilidad se relacionan con el índice de refracción de la siguiente manera:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (6)$$

3.2 Geometrías propuestas

En esta sección se emplean 4 geometrías distintas, ya reportadas en trabajos anteriores [11 14 19 20], las cuales se muestran en la figura 8 con el fin de comparar el desempeño de cada una de ellas y de este modo obtener la que presente mejor respuesta a la frecuencia para la aplicación propuesta.

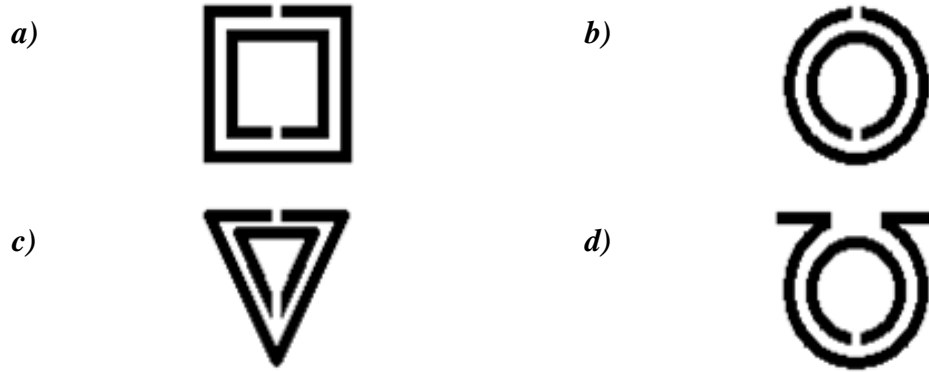


Figura 8. a) Geometría cuadrada b) Geometría circular c) Geometría triangular d) Geometría omega

3.3 Análisis del diseño basado en la frecuencia de resonancia

Para obtener la frecuencia de resonancia de cada una de las estructuras propuestas será necesario conocer tanto la inductancia (L) como la capacitancia (C) que generan cada una de ellas. La inductancia se puede obtener de manera general como [21]:

$$L = \frac{\mu_0 \pi^2}{I^2} \int_0^\infty [I(k)]^2 k^2 dk \quad (7)$$

Donde $I(k)$ es la transformada Fourier-Bessel de $i(k)$ que es la función actual del anillo.

Para conocer la capacitancia se emplea la siguiente expresión:

$$C = \left\{ \frac{\left(N \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} + \beta \right)^2 - \left(\frac{\Delta}{2} \right)^2}{2 \left(N \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{N} \right\} + \beta \right)} \right\} \times a \cdot C_{pul} \quad (8)$$

Donde N corresponde al número de lados de la geometría empleada, a es el radio de la geometría, C_{pul} es la capacitancia por unidad de tiempo y β se da por:

$$\beta = \frac{C_g}{a} \cdot C_{pul} \quad (9)$$

Cabe mencionar que el cálculo de estos dos parámetros ($L - C$) será distinto dependiendo de la geometría que se utilice.

3.3.1 Dimensiones

Las dimensiones a considerar para el diseño de un RAR son las siguientes:

- Longitud o radio de la geometría (según sea el caso).
- Ancho del conductor de los anillos.
- Ancho del dieléctrico entre los anillos.
- Ancho de la ranura de los anillos.
- Altura de la estructura.

Las cuáles serán un elemento indispensable para la obtención de la frecuencia de resonancia deseada, ya que el variar uno o más de estos parámetros influirán en la respuesta resonante de la estructura.

3.4 Geometría cuadrada

La primera estructura que se presenta es un RAR cuadrado [figura 9], para la cual podemos obtener su frecuencia de resonancia de la siguiente ecuación:

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_s}} \quad (10)$$

Donde C_s es la capacitancia equivalente y L es la inductancia efectiva para ambos anillos.

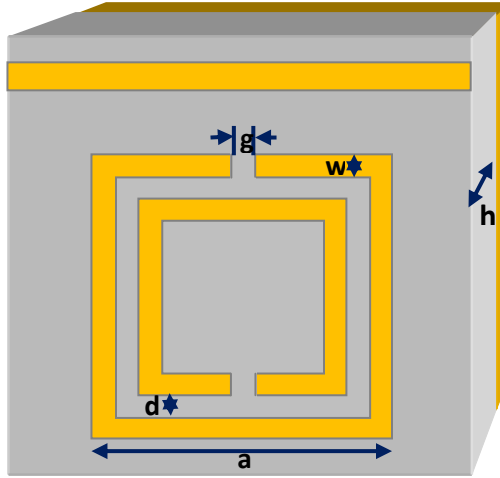


Figura 9. Estructura de RAR cuadrado.

Para la inductancia efectiva se utiliza [14]:

$$L = \frac{4.86\mu_o}{2} (a - w - d) \left[\ln \left(\frac{0.98}{\rho} \right) + 1.84\rho \right] \quad (11)$$

Donde a es la longitud del anillo exterior, w es el ancho del conductor del anillo, d es el ancho del dieléctrico que separa ambos anillos y ρ es el factor de relleno de la inductancia que se da por:

$$\rho = \frac{w + d}{a - w - d} \quad (12)$$

Así mismo, se obtiene la capacitancia efectiva de la siguiente ecuación:

$$C_s = \left[a - \frac{3}{2}(w + d) \right] C_{pul} \quad (13)$$

Donde C_{pul} es la capacitancia entre los anillos que se calcula como:

$$C_{pul} = \epsilon_0 \epsilon_{eff} \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \quad (14)$$

De la cual la constante dieléctrica efectiva ϵ_{eff} se puede expresar como:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (15)$$

Y $K(k)$ implica una integral elíptica completa de primer orden, donde

$$k = \frac{d}{d + 2w} \quad (16)$$

A partir de estas ecuaciones es posible obtener la primera frecuencia de resonancia para esta geometría, la cual puede variar dependiendo de las dimensiones que la estructura posea.

En la siguiente gráfica [figura 10] se observa como al modificar el tamaño del ancho del conductor también cambiará la frecuencia de resonancia de la misma.

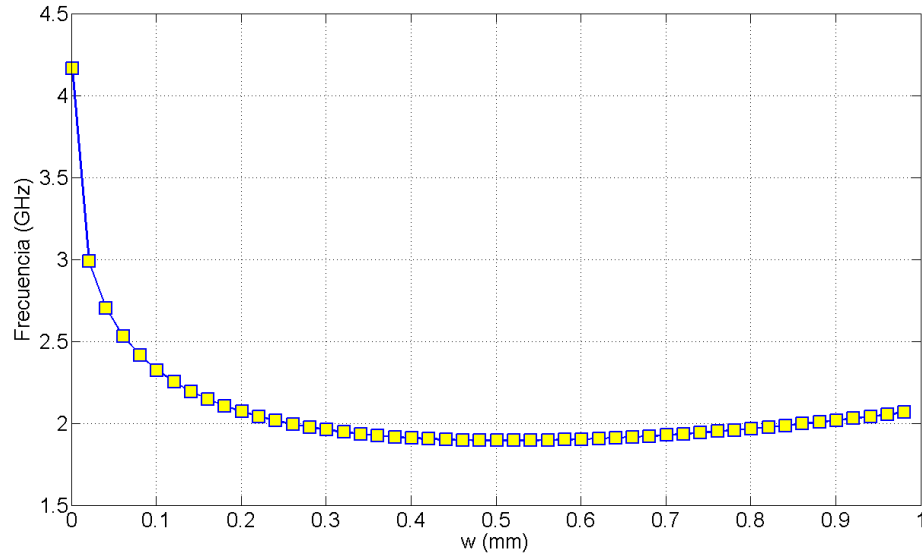


Figura 10. Frecuencias de resonancia para un RAR cuadrado.

3.5 Geometría circular

La segunda geometría que se presenta es la circular [figura 11] donde será necesario conocer el radio interno del anillo (R), el espesor del anillo (w), la altura (h) y el ancho de la ranura (g).

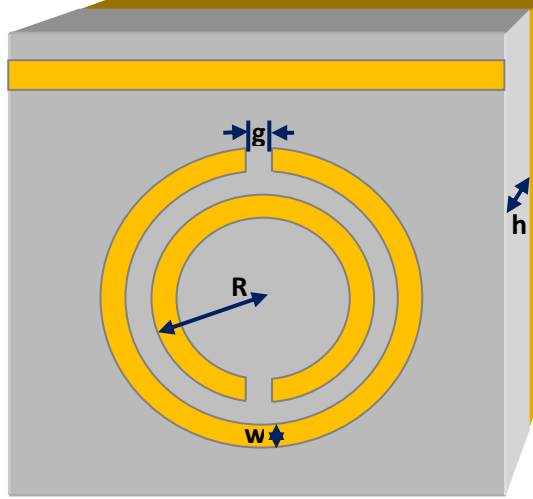


Figura 11. Estructura de RAR circular.

Esta estructura puede ser caracterizada, de igual manera, por su inductancia, L , y su capacitancia, C , empleando la siguiente ecuación:

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (17)$$

La inductancia, en este caso, se expresa como [19]:

$$L = \mu_o R_m \left(\ln \frac{8R_m}{h + w} - 0.5 \right) \quad (18)$$

En la cual μ_o es la permeabilidad en el espacio libre y R_m es el radio medio del anillo dado por:

$$R_m = R + \frac{w}{2} \quad (19)$$

Para calcular la capacitancia, tanto en la ranura como en el dieléctrico entre los anillos, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$C_{gap} = \epsilon_0 \left[\frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{2.4h}{w}\right)} \right] \quad (20)$$

Para la capacitancia en la ranura del anillo y

$$C_{surf} = \frac{2\epsilon_0 h}{\pi} \ln\left(\frac{4R}{g}\right) \quad (21)$$

Para la capacitancia obtenida en la superficie de la estructura.

Y suponiendo que ambas capacitancias son paralelas, la capacitancia total estaría dada por:

$$C = C_{gap} + C_{surf} \quad (22)$$

A partir de estas fórmulas será posible obtener la frecuencia de resonancia al variar el valor de los parámetros en esta estructura, como se puede observar en la figura 12.

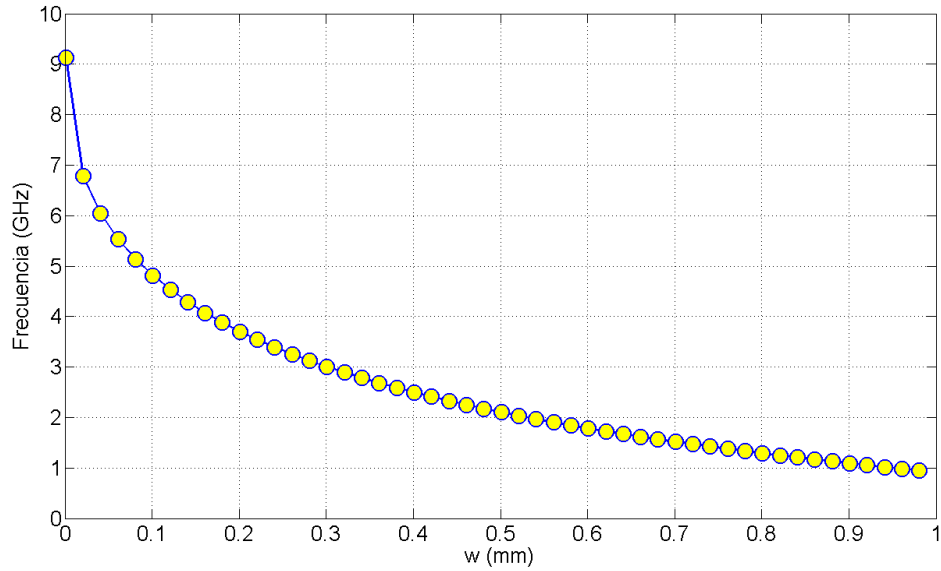


Figura 12. Frecuencias de resonancia para un RAR circular.

3.6 Geometría triangular

El RAR triangular es la tercer geometría que se presenta en este trabajo.

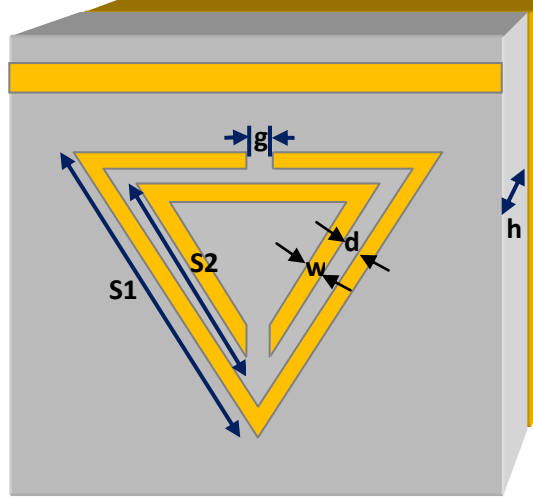


Figura 13. Estructura de RAR triangular.

Para obtener su frecuencia de resonancia es necesario conocer los siguientes parámetros [figura 13]:

S_1 , longitud del anillo exterior.

S_2 , longitud del anillo interior.

w , ancho del conductor.

d , ancho del dieléctrico entre anillos.

g , ancho de la ranura de los anillos.

h , altura de la estructura.

Y al igual que en las geometrías anteriores obtendremos tanto inductancia como capacitancia generada al excitar la estructura con un campo magnético perpendicular a la misma.

Para conocer la inductancia se utiliza la siguiente ecuación [20]:

$$L_c = \frac{\mu_o \epsilon_{eff}}{4} (3S_{avg} - 4w - 4d) \left(\frac{K(k')}{K(k)} \right) \quad (23)$$

En donde $K(k')$ y $K(k)$ denotan una integral elíptica completa de primer orden para la cual

$$k = \frac{d}{d+2w} \quad , \quad k' = \sqrt{1-k^2} \quad (24)$$

ϵ_{eff} denota la permitividad efectiva de la estructura, μ_o la permeabilidad en el espacio libre y S_{avg} esta dada por:

$$S_{avg} = \frac{S1 + S2}{2} \quad (25)$$

Para calcular la capacitancia se emplea la siguiente ecuación:

$$C_c = \frac{6\epsilon_0\mu_r S_{avg}}{\pi} \left[\ln\left(\frac{S_{avg}}{4w}\right) - 1.405 \right] \quad (26)$$

donde ϵ_0 denota la permitividad en el espacio libre y μ_r la permeabilidad relativa del material.

A partir de estas ecuaciones, es que obtenemos la frecuencia de resonancia para esta geometría empleando la siguiente expresión:

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (27)$$

Al igual que en los diseños anteriores, al modificar uno o más parámetros de la estructura se obtendrán distintos valores en la frecuencia de resonancia. Un ejemplo de ello se ilustra en la figura 14.

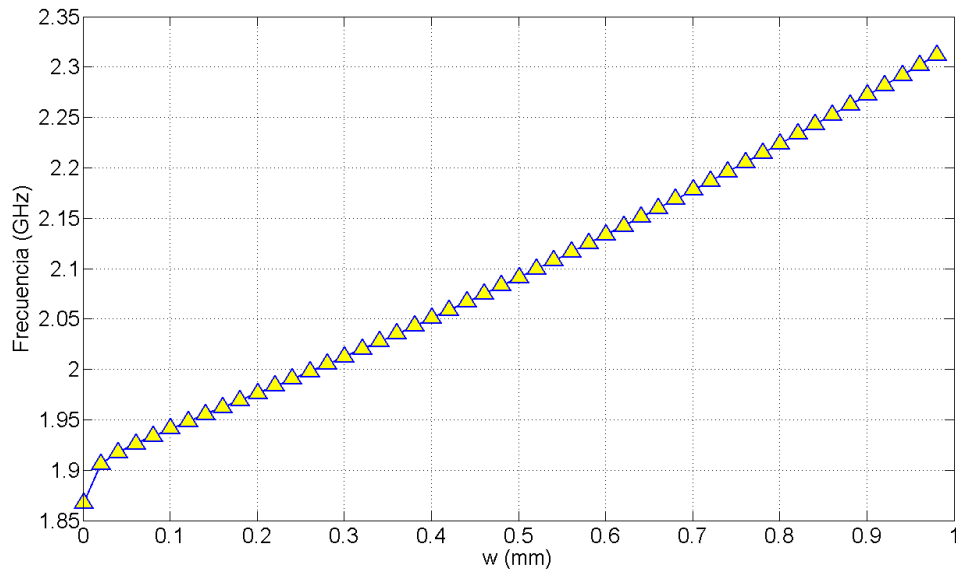


Figura 14. Frecuencias de resonancia para un RAR triangular

3.7 Geometría omega

La cuarta geometría a analizar es el RAR en forma de letra griega omega mayúscula, la cual para obtener su frecuencia de resonancia se requiere conocer los valores del radio de la figura (R), el ancho del conductor (w), la longitud de la figura (l), el ancho de la ranura (g) y la altura de la estructura (t) [figura 15].

Para obtener la inductancia total se requerirá de la suma de tres contribuciones [11]:

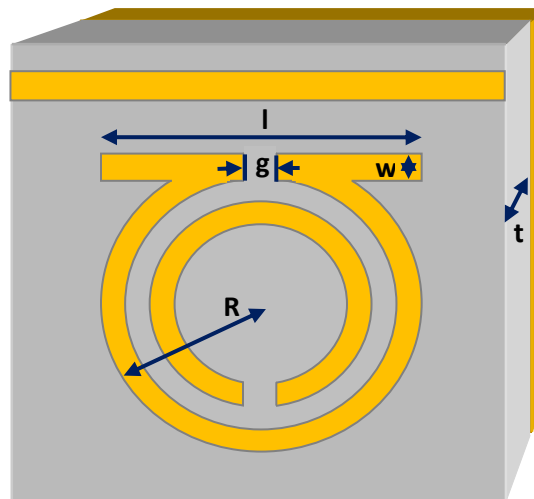


Figura 15. Estructura de RAR omega.

1. Inductancia en la ranura:

$$L_g = \mu_o \mu_r (w + t + g) \quad (28)$$

2. Inductancia en la franja horizontal:

$$L_f = \mu_o \mu_r \left(\frac{2w}{\pi} \right) \operatorname{arccos} h \left(\frac{l - g}{g} \right) \quad (29)$$

3. Inductancia en el disco:

$$L_d = \mu_o \mu_r 2(r - w) \left(\frac{K(k')}{K(k)} \right) \quad (30)$$

De la cual $K(k')$ y $K(k)$ denotan una integral elíptica completa de primer orden para la cual

$$k = \frac{2(r - w)}{2r} \quad (31)$$

Por lo tanto la inductancia total para un SRR en omega será:

$$L_{tot} = L_g + L_f + L_d \quad (32)$$

Teniendo en cuenta que ϵ_r es la permitividad relativa del sustrato dieléctrico de la estructura y que ϵ_0 es la permitividad en el espacio libre, podremos obtener la capacitancia del RAR de la siguiente manera:

$$C_{tot} = \epsilon_o \epsilon_r r \left[\log \left(\pi \frac{8r}{w + t} \right) - 2 \right] \quad (33)$$

Al obtener los resultados tanto de capacitancia como de inductancia en esta geometría, podremos calcular la frecuencia de resonancia con la expresión siguiente:

$$F_o = \frac{1}{\sqrt{L_{tot} C_{tot}}} \quad (34)$$

A partir de este análisis será posible obtener la frecuencia de resonancia para distintas dimensiones del RAR en omega como se puede observar en la figura 16.

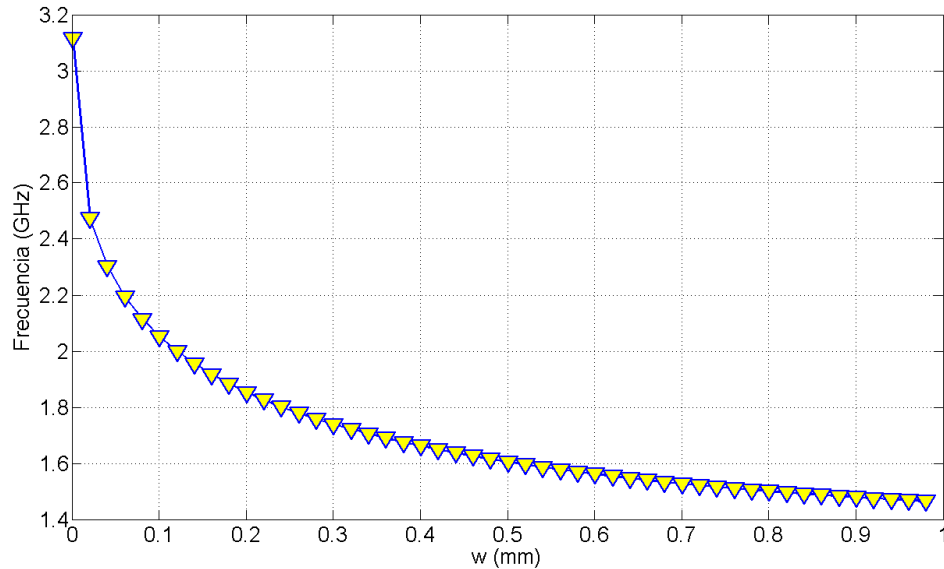


Figura. 16 Frecuencias de resonancia para un RAR omega.

3.8 Comparación

En la siguiente gráfica [figura 17] se presenta una comparación entre las geometrías descritas anteriormente, de este modo podemos ver el desempeño de cada una de ellas teniendo como variación únicamente el ancho del conductor en los cuatro casos en la Tabla 1 se muestran las dimensiones utilizadas en cada una de las estructuras para la obtención de la frecuencia de resonancia.

RAR	I	R	w	d	g	h
Cuadrado	7.95 mm	--	0 – 1 mm	0.265 mm	0.265 mm	0.1325 mm
Circular	--	3.975 mm	0 – 1 mm	0.53 mm	0.265 mm	0.1325 mm
Omega	7.95 mm	3.975 mm	0 – 1 mm	0.53 mm	0.265 mm	0.1325 mm
Triangular	7.95 mm	--	0 – 1 mm	0.795 mm	0.265 mm	0.1325 mm

TABLA 1. Dimensiones utilizadas en cada geometría.

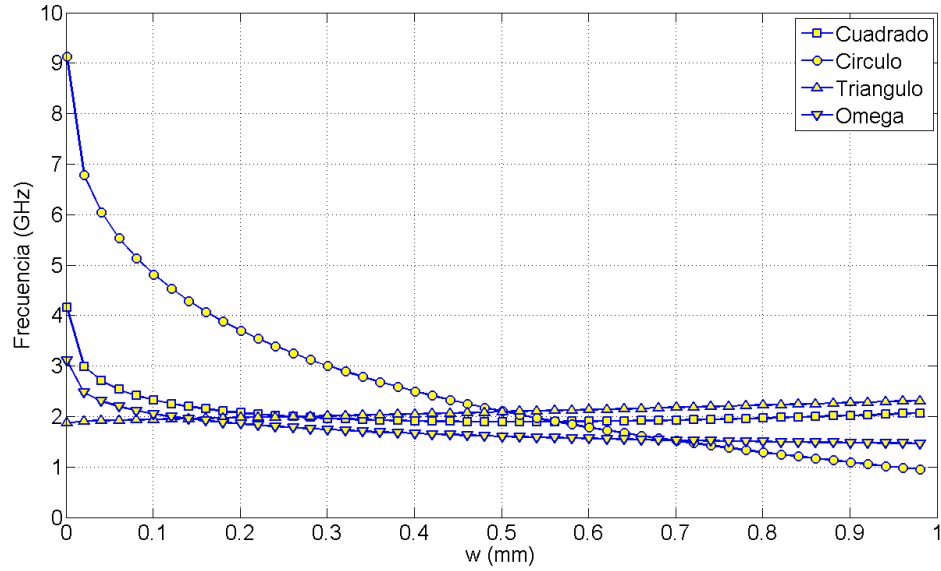


Figura. 17 Comparación de las 4 geometrías a utilizar.

Para los cuatro casos bajo estudio se ha utilizado un $\epsilon_r = 2.2$, $\epsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ para las propiedades del dieléctrico y $\mu_r = 0.99998$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ como propiedades del metal a utilizar.

Cabe mencionar que al cambiar uno o varios de los elementos que conforman a dichas estructuras, será posible modificar su frecuencia de resonancia.

3.9 Conclusión

El análisis de las distintas geometrías en este capítulo permite conocer el comportamiento de cada una en cuanto a la frecuencia de resonancia, esto de manera analítica. El conocer la frecuencia a la cual trabaja mejor el resonador nos permite diseñar el resonador de acuerdo a las características de la señal que se detectará y con la cual se va a trabajar; de igual manera influye en esto las dimensiones y materiales empleados en ellos.

El parámetro de diseño (w) que se utilizó en esta sección nos permite seleccionar entre los cuatro resonadores cual es más robusto al cambio del ancho de la pista metálica. En este caso las geometrías cuadrada y omega son las de la menor variación como se puede ver en la figura 16, esto en comparación con la geometría más popular: el círculo.

Capítulo 4

MODELADO DE LOS RESONADORES DE ANILLO RANURADO (RAR)

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis del modelado numérico para los resonadores en las cuatro geometrías, considerando la estructura real del sistema. En este análisis se conservan las dimensiones de los resonadores con respecto al capítulo anterior.

De este modo se analizarán los RAR modelando de manera realística para poder obtener la frecuencia de resonancia a la cual la respuesta de los resonadores es máxima a una señal con ancho espectral grande.

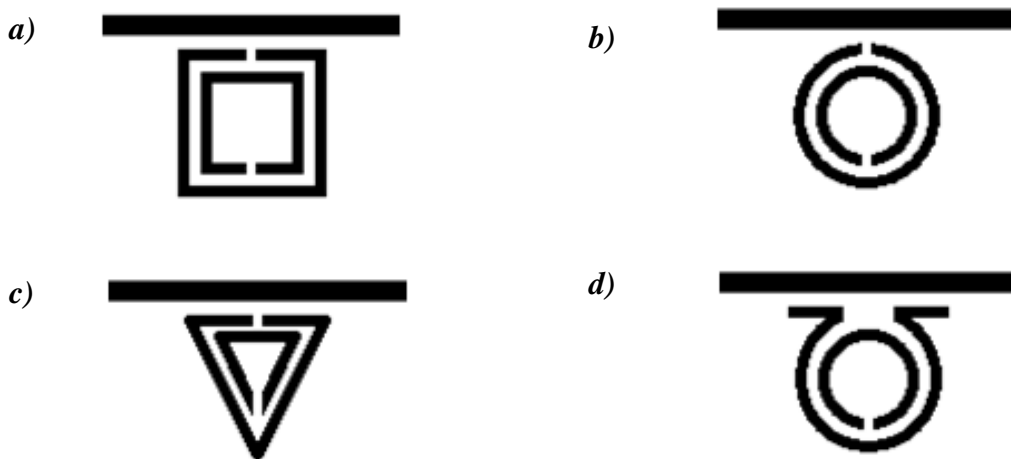


Figura. 18. *a) Geometría cuadrada; b) Geometría circular; c) Geometría triangular; d) Geometría omega. Todas ellas con guía de onda.*

4.2 El resonador

Como se ha mencionado en el capítulo 2, un resonador es un dispositivo capaz de confinar energía dentro de su estructura, la cual oscila a la frecuencia de resonancia característica del resonador. La energía correspondiente a la frecuencia resonancia del resonador presentara una absorción mayor ya que queda confinada al resonador.

La respuesta a la señal que presenta cada resonador depende de la geometría y las dimensiones de los mismos, así como de los materiales que sean utilizados en ella.

4.3 Guía de onda y resonador

En este caso de estudio será necesario emplear una guía de onda, por la cual se inyecta la señal de excitación y se mide la respuesta del sensor tanto en reflexión como en transmisión. Esto monitoreando la energía absorbida (o confinada) por el resonador.

El método es inyectar un pulso gaussiano con un ancho temporal muy corto para tener un ancho espectral grande ya que el ancho de banda espectral es inversamente proporcional al ancho temporal ($\Delta\nu \propto 1/\Delta t$).

En la figura 19 se ilustra la manera en que el RAR se coloca junto a la guía de onda por la cual se hace pasar el pulso electromagnético con forma Gaussiana angosto.

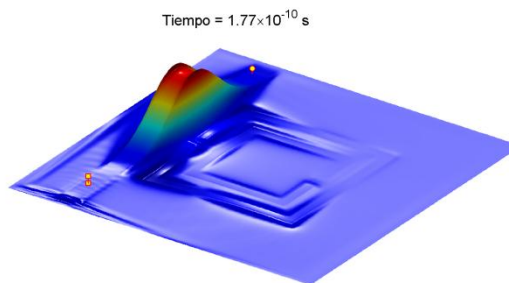


Figura. 19. Resonador de anillo ranurado circular en contacto con la guía de onda.

4.4 Método numérico

El método de Diferencia Finita en el Dominio del tiempo, FDTD (por sus siglas en inglés), fue desarrollado por Kane S. Yee en el año de 1966 [22] al reemplazar las ecuaciones de Maxwell por un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas.

En los últimos años el FDTD ha demostrado ser una herramienta computacional muy útil en electromagnetismo para modelar la interacción de ondas electromagnéticas con diferentes estructuras.

Las ecuaciones de Maxwell describen el comportamiento en el tiempo y en el espacio de los campos magnético (B) y eléctrico (E). Los distintos problemas que se presentan son especificados por las condiciones de frontera que describen las situaciones físicas como la posición de los conductores en un circuito.

Para la realización de la celda de Yee se ha empleado un medio isotrópico en donde las ecuaciones de Maxwell son las siguientes:

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \nabla \times E = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} - \nabla \times H = J \quad (36)$$

$$B = \mu H \quad (37)$$

$$D = \epsilon E \quad (38)$$

Donde J, μ, ϵ varían en función del tiempo y el espacio.

En un sistema de coordenadas rectangular las ecuaciones (35) y (36) son equivalentes en el siguiente sistema de ecuaciones escalares:

$$-\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \quad (39)$$

$$-\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (40)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (41)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x \quad (42)$$

$$\frac{\partial D_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y \quad (43)$$

$$\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z \quad (44)$$

Si $A = (A_x, A_y, A_z)$, entonces podemos obtener un punto en el espacio como:

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (45)$$

y para una función en espacio y tiempo tendremos:

$$F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k) \quad (46)$$

Las 6 ecuaciones anteriores (39-44) son la base para el método FDTD y en la siguiente ilustración podemos observar la distribución de los componentes eléctricos (E) y magnéticos (H) (figura 20).

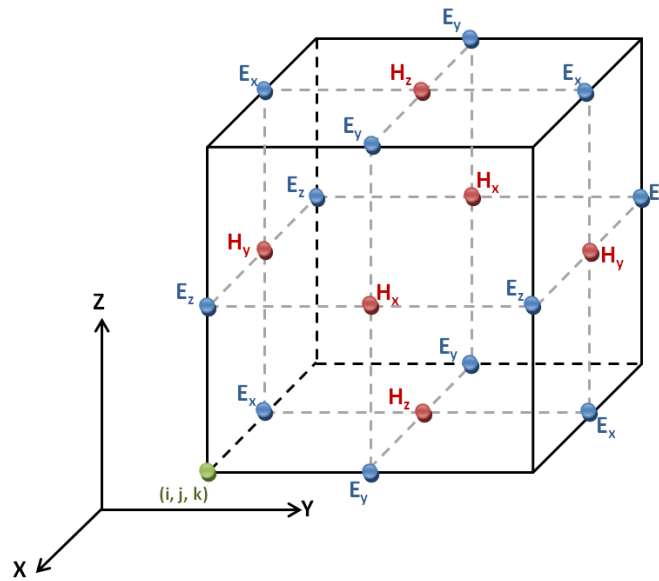


Figura. 20. Celda de Yee, Los componentes del campo E se ubican a mitad de las aristas y los componentes del campo H al centro de las caras

Para este caso presentamos las ecuaciones de Maxwell en función del tiempo en espacio libre [3].

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0} \nabla_x H \quad (47)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \nabla_x E \quad (48)$$

Donde H y E representan vectores en tres dimensiones.

Para fines ilustrativos se presenta el caso unidimensional utilizando E_x y H_y , dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (49)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = - \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (50)$$

Estas son las ecuaciones para una onda con el campo eléctrico orientado en dirección x , el campo magnético orientado en dirección y y viajando en dirección z . De este modo, si tomamos las aproximaciones de la diferencia central para ambas derivaciones, temporal y espacial, tendremos

$$\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(k)}{\Delta t} = - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{H_y^n\left(k + \frac{1}{2}\right) - H_y^n\left(k - \frac{1}{2}\right)}{\Delta x} \quad (51)$$

$$\frac{H_y^{n+1}\left(k + \frac{1}{2}\right) - H_y^n\left(k + \frac{1}{2}\right)}{\Delta t} = - \frac{1}{\mu_0} \frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k+1) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\Delta x} \quad (52)$$

Donde n es un tiempo $t = \Delta t * n$, el término $n + 1$ es un tiempo después, k es la distancia $z = \Delta x * k$. A partir de esto H utiliza los argumentos $k + \frac{1}{2}$ y $k - \frac{1}{2}$ para indicar que los valores del campo H se localizan entre los valores del campo E (figura 21).

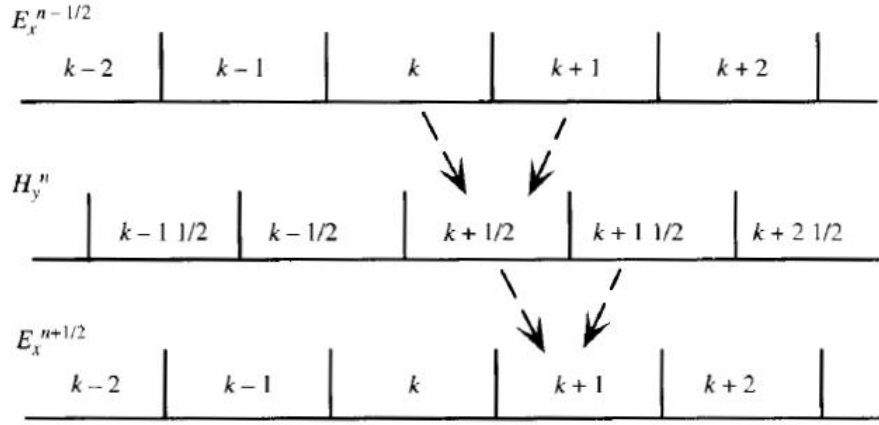


Figura. 21.- Entrelazado de los campos E y H en espacio y tiempo en la formulación FDTD.

Una vez que se determina el tamaño de Δx se podrá determinar Δt de la siguiente manera:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2 * c_0} \quad (53)$$

Donde c_0 es la velocidad de la luz en el espacio libre.

Una onda electromagnética propagándose en el espacio libre no puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Partiendo de (50) podemos definir una ecuación general como:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{n} * c_0} \quad (54)$$

Donde n es la dimensión de la simulación.

4.5 Modelado computacional

Para la realización del modelado computacional ha sido necesario crear un pulso Gaussiano como señal de entrada, el cual estará en contacto con la estructura resonante (RAR) por medio de una guía de onda lo que permitirá generar la respuesta a la frecuencia de la geometría que sea empleada en cada caso.

4.5.1 Señal de entrada

Para el modelado computacional se emplea un pulso Gaussiano como señal de entrada el cual está dado por:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (55)$$

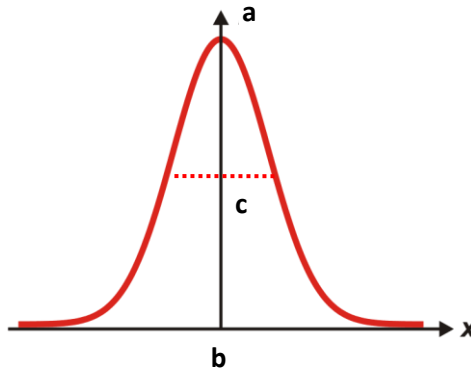


Figura. 22.- Campana de Gauss.

Donde a , b , c son números reales ($c > 0$). La función Gaussiana es simétrica con forma de campana, por lo que es conocida como *campana de Gauss*. El parámetro a es la amplitud de la campana centrada en el punto $x = b$, determinando c el ancho de la misma como se puede observar en la figura 22.

La transformada de Fourier de la función Gaussiana es su representación en el dominio de la frecuencia; se suele decir que esta función es auto-transformable ya que resulta una Gaussiana en el dominio de la frecuencia. Las características del espectro gaussiano con respecto al temporal son, mientras más corto es el pulso más ancho será el espectro que se obtenga y viceversa, como lo podemos observar en la figura 23.

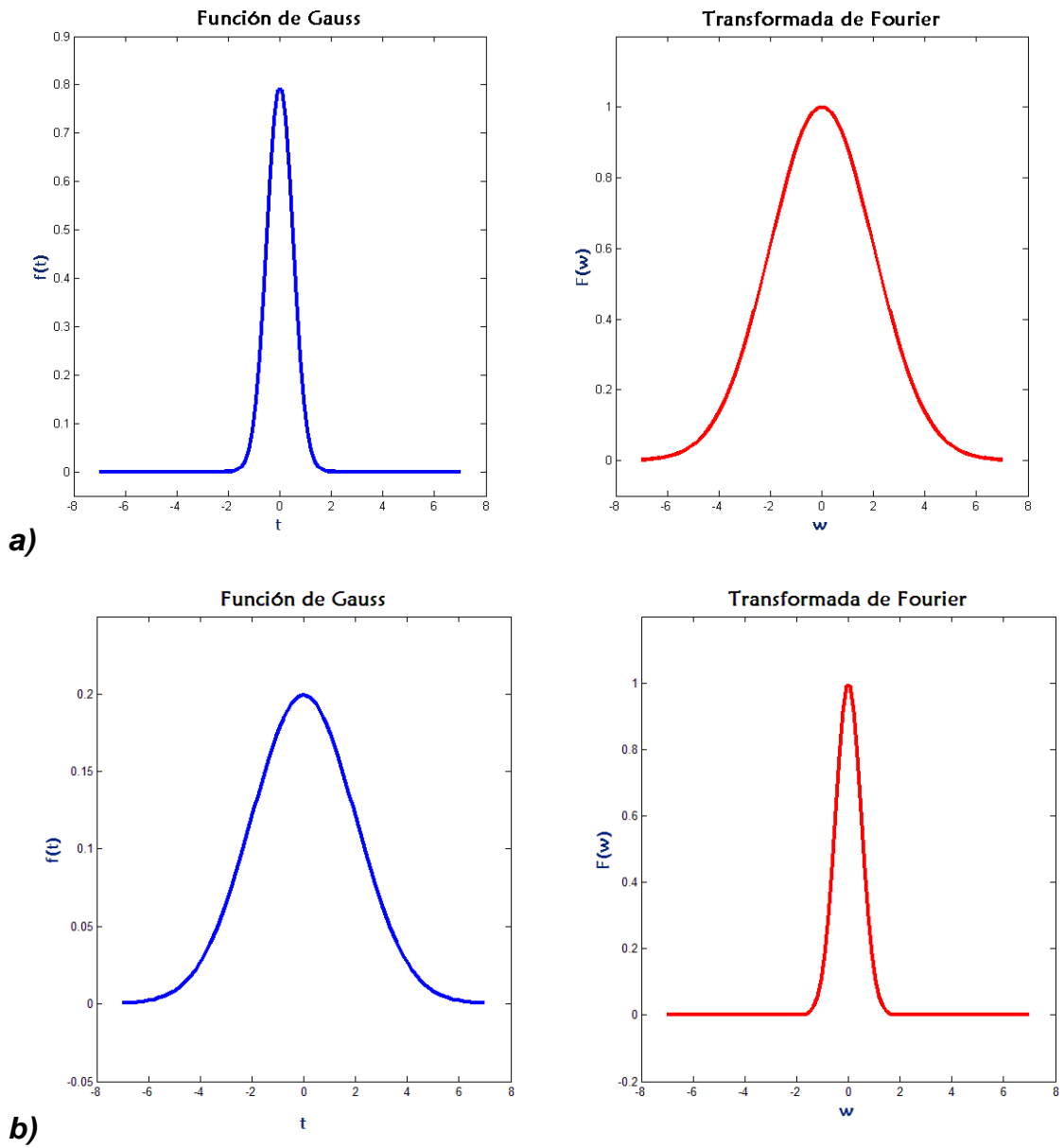


Figura. 23.- Campana de Gauss y su transformada de Fourier para **a)** $c=0.5$ **b)** $c=2$

4.5.2 Geometría cuadrada

El primer caso que se presenta es la geometría cuadrada. En la figura 24 se muestra el modelado del resonador y de la señal inyectada, donde en a) se observa el pulso Gaussiano pasando por la guía de onda y se ilustra la energía que intercambia con el resonador, en b) el pulso ha salido del dominio computacional y se observa la energía que queda confinada en el RAR. Para conocer la respuesta a la señal del RAR se colocan dos puntos de medición en la guía de onda, uno al inicio para la reflexión y otro al final para la transmisión.

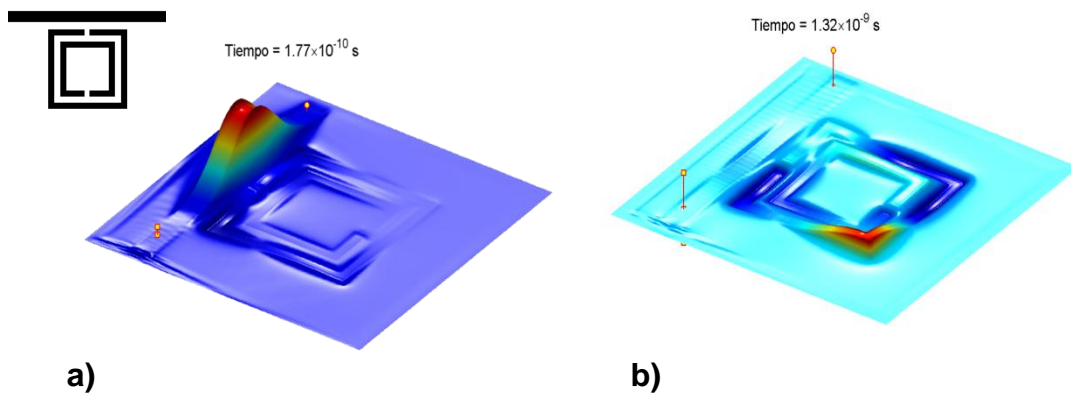


Figura. 24. Resonador de anillo ranurado cuadrado

La respuesta del resonador se presenta en la figura 25 en la cual se observan las pérdidas con respecto a la señal de entrada, los picos más pronunciados (hacia abajo) implican la pérdida de energía a la frecuencia correspondiente con respecto a la señal de entrada, esto porque tal energía se ha confinado al resonador.

Se muestran dos curvas, las cuales corresponden a la energía reflejada en azul y a la energía transmitida en rojo, medida sobre la guía de onda, se observan las principales frecuencias de resonancia se dan a 1.43GHz en reflexión y de 2.11GHz en transmisión.

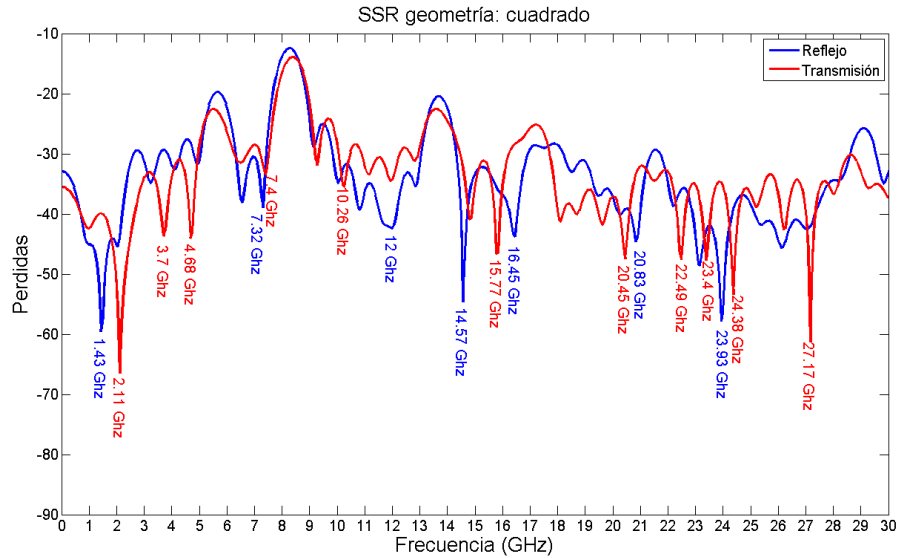


Figura. 25. Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR cuadrado.

4.5.3 Geometría circular

El segundo caso que se presenta es el RAR con una geometría circular. La figura 26a muestra el RAR durante el paso del pulso gaussiano sobre la guía de onda. La figura 26b muestra la energía confinada al resonador tiempo después que la señal de entrada salió del área del sensor.

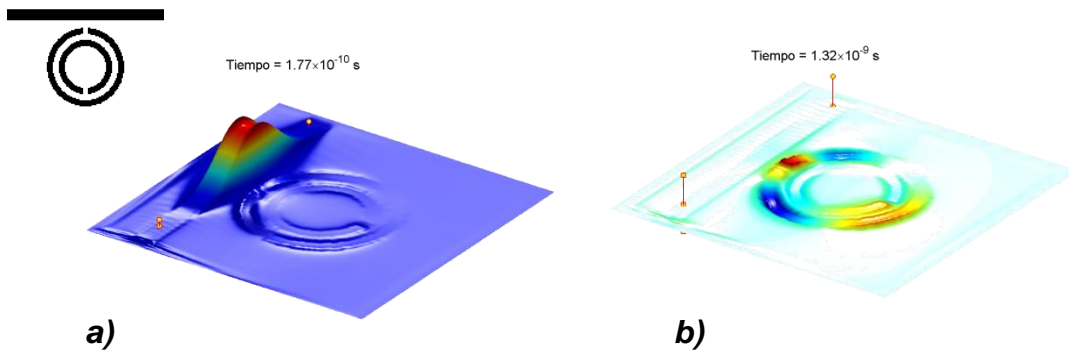


Figura. 26. Resonador de anillo ranurado circular

En la figura 27 se muestra el espectro de frecuencias, respuesta del RAR a la señal de entrada. Se observa una serie de picos de absorción tanto para la reflexión como para la transmisión. Las frecuencias fundamentales se encuentran a 2.19 para la reflexión y 1.74 para la transmisión.

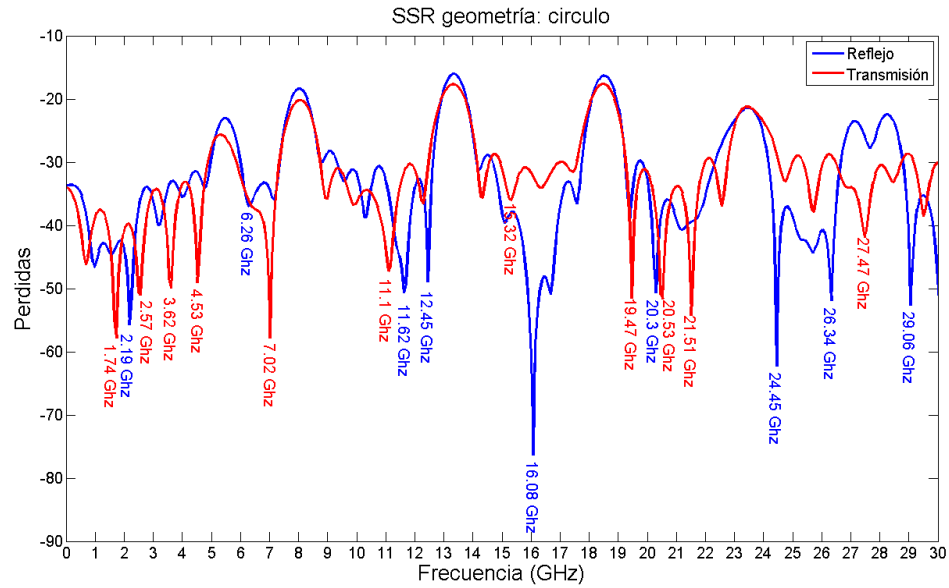


Figura. 27. Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR circular.

4.5.4 Geometría triangular

La tercera geometría a presentar es la triangular. La figura 28a muestra el resonador absorbiendo energía de la señal de entrada. La figura 28b muestra las oscilaciones de la energía confinada en un instante en particular.

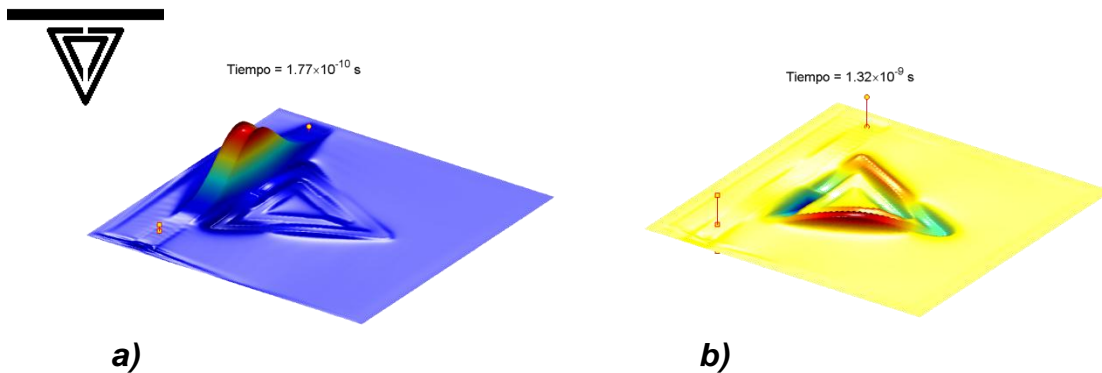


Figura. 28. Resonador de anillo ranurado triangular

La figura 29 muestra el espectro de absorción debido a esta estructura, en este caso las frecuencias principales se dan a 2.19 GHz tanto para la reflexión como para la transmisión.

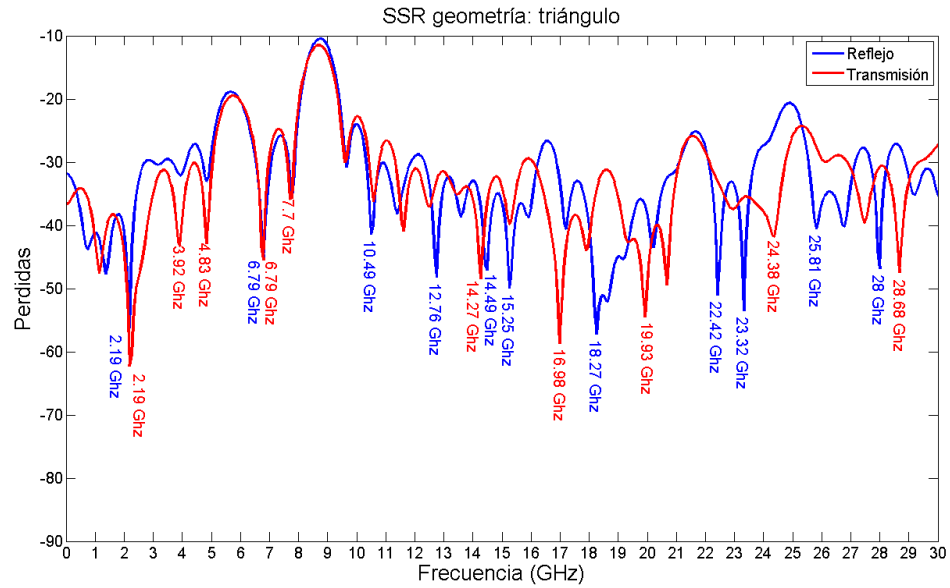


Figura. 29. Frecuencias de resonancia de reflexión y transmisión para un RAR triangular.

4.5.5 Geometría omega

El cuarto y último caso es el de la geometría en forma de la letra griega omega (Ω). La figura 30 muestra el momento de la absorción de la energía y las oscilaciones de esta una vez confinada al resonador en un instante en particular.

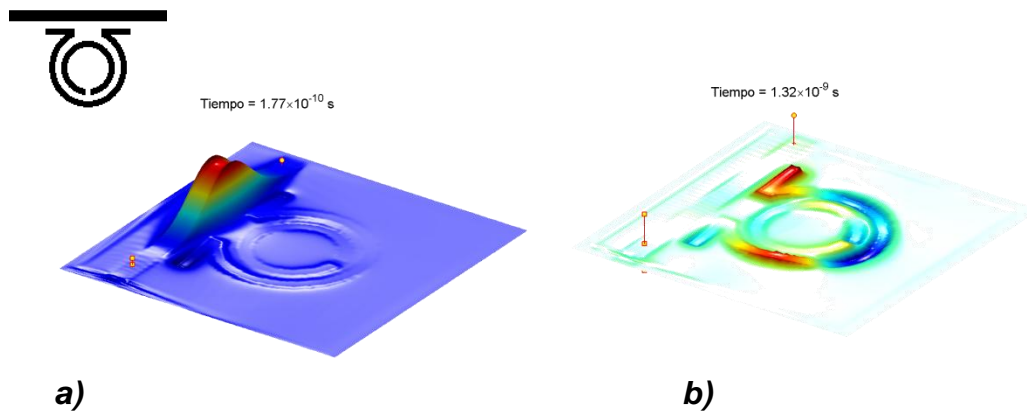


Figura. 30. Resonador de anillo ranurado omega

La figura 31 muestra la respuesta del resonador, y se observa la frecuencia fundamental a 1.36 GHz para la reflexión y 1.21 GHz para la transmisión.

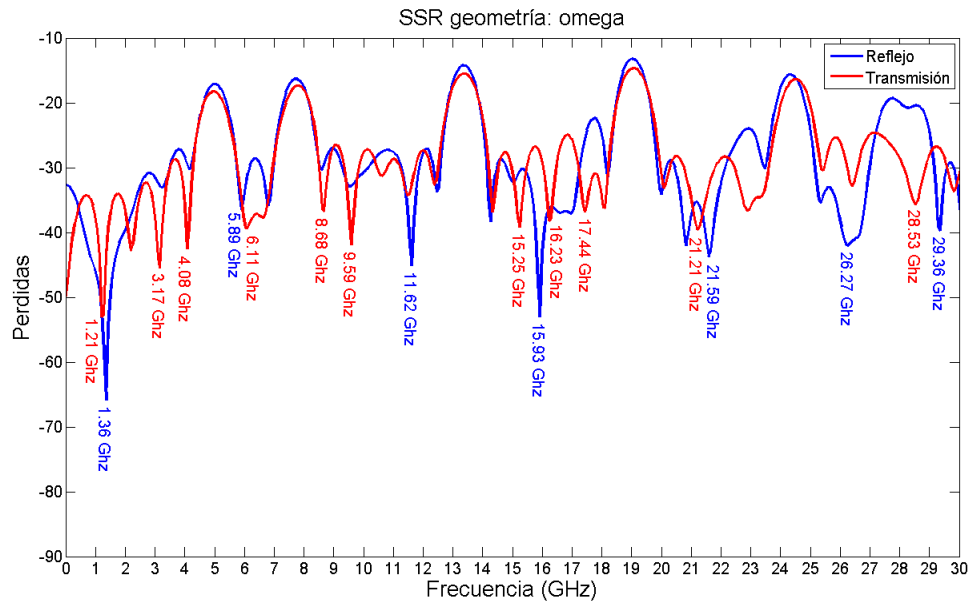


Figura. 31. Frecuencias de resonancia de Reflexión y Transmisión para un RAR omega.

4.6 Análisis de diseño

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos en el diseño (capítulo 3) y el modelado computacional desarrollado en el presente capítulo, esto con el fin de observar las similitudes y/o diferencias entre ambos casos.

4.6.1 Geometría cuadrada

En la figura 32 se ilustra el resultado para una geometría cuadrada donde el ancho del conductor es 0.53mm se ha obtenido una frecuencia de resonancia de 1.89GHz en el análisis del diseño, en cambio al aplicar la señal de entrada en el modelado computacional se tuvo una frecuencia de 1.43 GHz para la reflexión y 2.11 GHz en la transmisión.

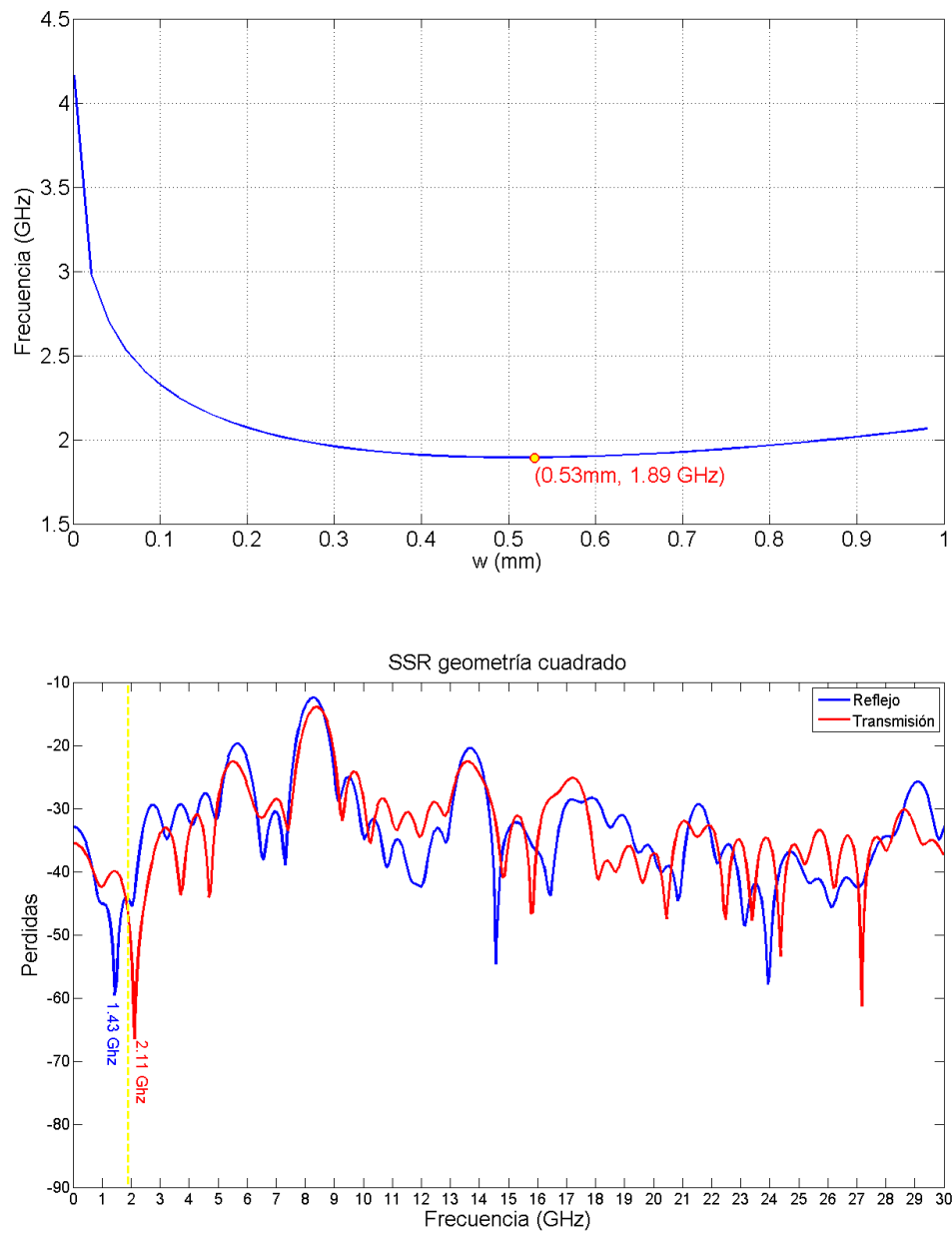


Figura. 32. Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR cuadrado. La línea discontinua representa el cálculo teórico.

4.6.2 Geometría circular

En el caso de la estructura circular, se ha empleado un RAR cuyo ancho de conductor es de 0.53mm tanto en el análisis de diseño como en el modelado computacional.

En la figura 33 se muestran los resultados obtenidos en esta geometría, donde la frecuencia obtenida en el análisis de diseño fue de 2.00 GHz y en el modelado computacional fue de 2.19 GHz (reflexión) y 1.74 GHz (transmisión).

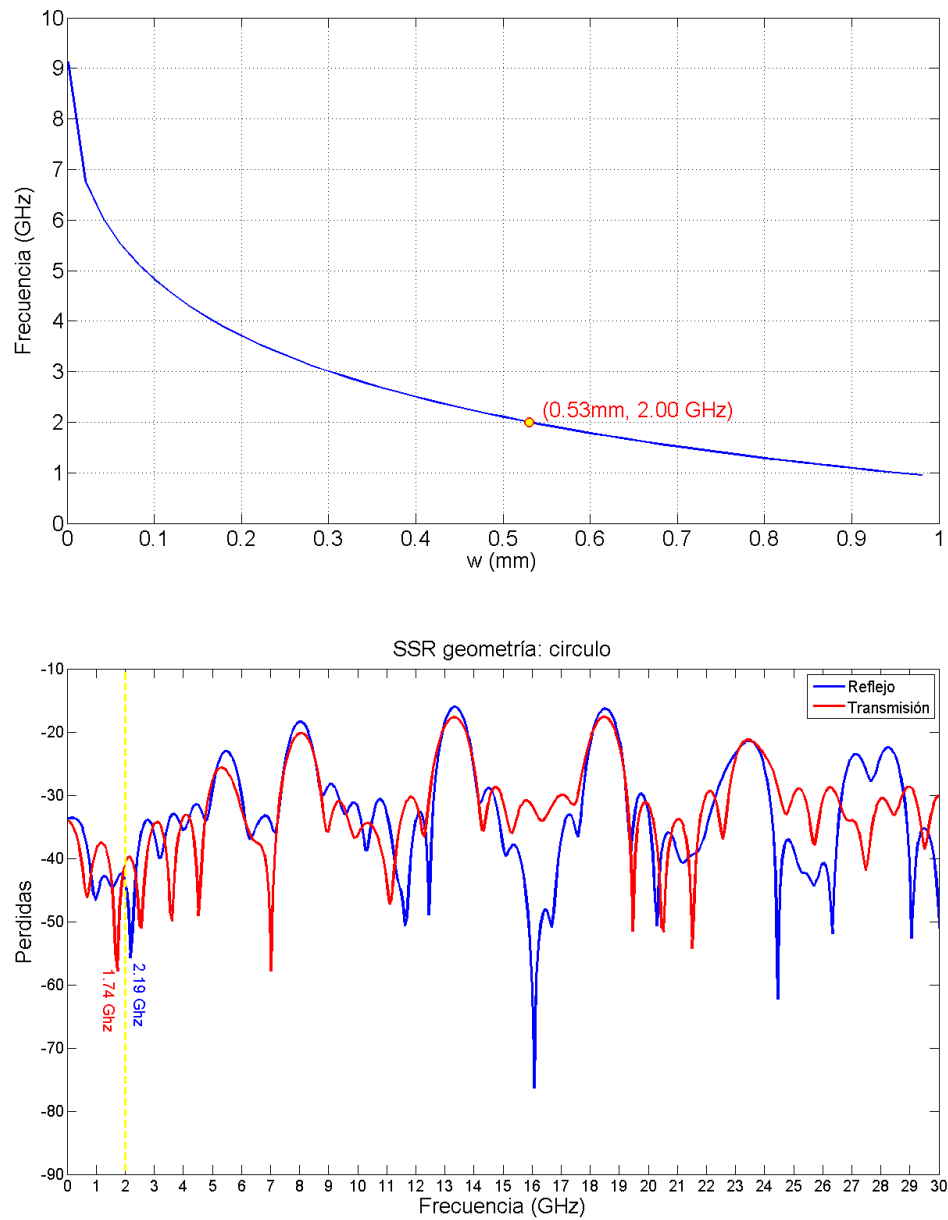


Figura. 33. Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR circular. La línea discontinua representa el cálculo teórico.

4.6.3 Geometría triangular

La figura 34 ilustra los resultados para la geometría triangular donde el RAR tiene un ancho de conductor de 0.53 mm. Se obtiene una frecuencia de resonancia de 2.10 GHz en el análisis de diseño y de 2.19 GHz (reflexión y transmisión) en el modelado computacional.

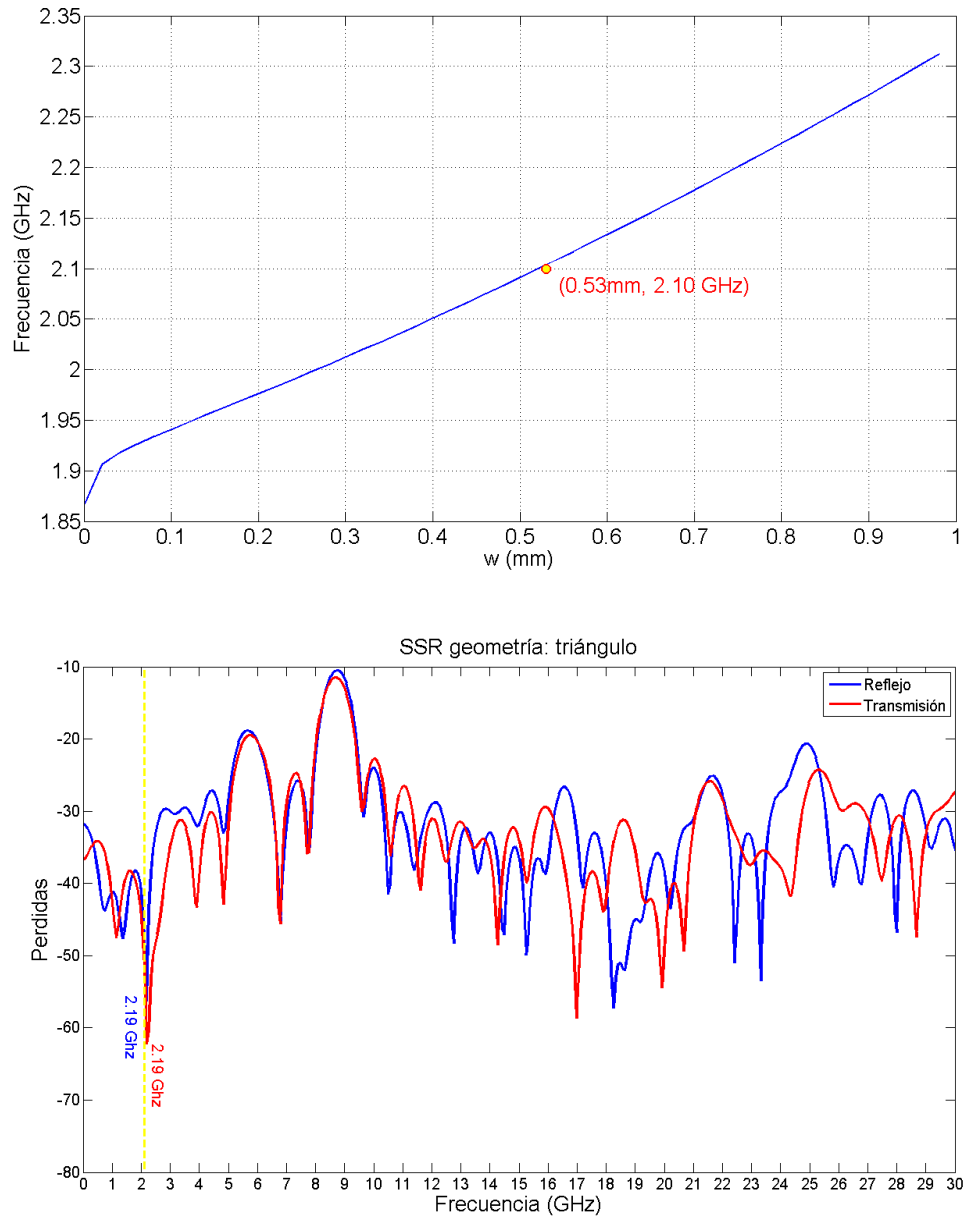


Figura. 34. Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR triangular. La línea discontinua representa el cálculo teórico

4.6.4 Geometría omega

En esta estructura se ha empleado la geometría en omega que posee un ancho de conductor de 0.53 mm lo que le permite obtener una frecuencia de resonancia de 1.60 GHz en el análisis del diseño y de 1.36 (reflexión) y 1.21 GHz (transmisión) en el modelado computacional, como se muestra en la figura 35.

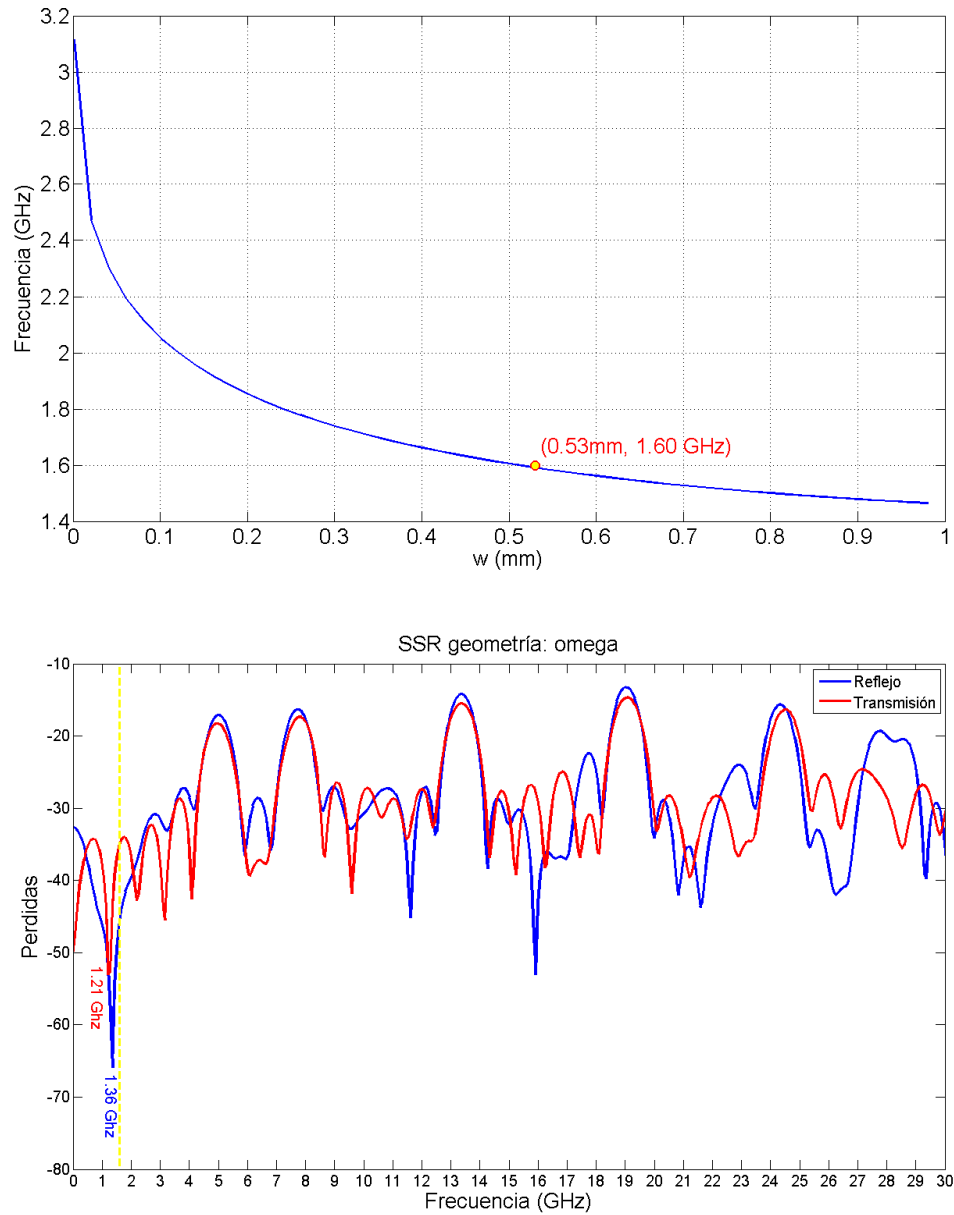


Figura. 35. Resonancias teórica (grafica superior) y numérica (inferior) del RAR omega. La línea discontinua representa el cálculo teórico.

Como se puede observar al comparar los resultados obtenidos en el análisis del diseño y los obtenidos en el modelado computacional hay cierta variación, esto debido a la distribución de los campos magnético y eléctrico (figura 36).

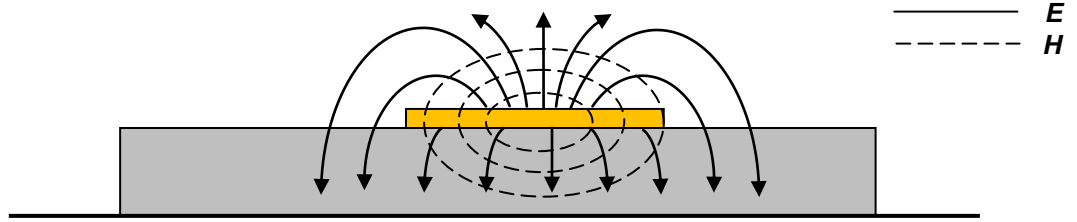


Figura. 36. Distribución de los campos en la sección transversal del RAR.

El campo eléctrico se orienta hacia el conductor superior, en nuestro caso el RAR, observándose un desbordamiento el cual puede ser minimizado al emplear dieléctricos con una constante relativa elevada. Y el campo magnético está orientado a modo de círculos, cumpliendo así la propiedad de perpendicularidad con el campo eléctrico.

La onda electromagnética en el RAR existe tanto en el sustrato dieléctrico como en el aire que hay sobre él. En la mayoría de los casos la constante dieléctrica utilizada en el sustrato será mayor que la del aire, por lo que la velocidad de propagación se encontrará entre la velocidad de las ondas de radio del sustrato y la velocidad de las ondas de radio en el aire.

Este comportamiento se describe con la constante dieléctrica efectiva:

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad \frac{W}{h} > 1 \quad (54)$$

donde W es el ancho del RAR y h el espesor del sustrato dieléctrico.

Las dimensiones que se manejan para cada una de las geometrías se presentan en la siguiente tabla:

RAR	l	R	w	d	g	h
Cuadrado	7.95 mm	--	0.53 mm	0.27 mm	0.27 mm	0.13 mm
Circular	--	3.98 mm	0.53 mm	0.53 mm	0.27 mm	0.13 mm
Omega	7.95 mm	3.98 mm	0.53mm	0.53 mm	0.27 mm	0.13 mm
Triangular	7.95 mm	--	0.53 mm	0.79 mm	0.27 mm	0.13 mm

TABLA 2. Dimensiones utilizadas en cada geometría.

Al igual que en el capítulo anterior se han empleado en los 4 casos un $\epsilon_r = 2.2$, $\epsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ y $\mu_r = 0.99998$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ como propiedades del metal a utilizar.

4.7 Conclusión

En este capítulo se ha presentado el comportamiento de cada una de las geometrías en respuesta al pulso gaussiano. La frecuencia de resonancia de cada estructura es diferente debido a la diferencia de geometrías.

De acuerdo al análisis de los métodos de cálculo se muestra una aproximación muy cercana entre los resultados de ambos métodos, donde la diferencia se podría justificar debido a que el cálculo de diseño del capítulo 3 se hace sin tomar en cuenta la guía de onda y suponiendo una onda plana incidiendo en el resonador. Aun y con esta diferencia en la interpretación de los modelos las respuestas por ambos métodos tienen gran concordancia.

Capítulo 5

SENSORES BASADOS EN RESONADORES DE ANILLO RANURADO

5.1 Modelo del sensor

Como se aborda en el capítulo 2, los Resonadores de Anillo Ranurado son utilizados para la fabricación de sensores en diversos campos de estudio.

En esta sección se presenta el uso del RAR como sensor, ya que se coloca sobre él un material con una permitividad distinta a la que posee el aire, es decir distinto a 1. En la figura 37 se aprecia de manera gráfica la posición de cada uno de los componentes que conforman la estructura.

Tanto la guía de onda como el RAR se encuentran en contacto con el material a sensor, por lo que la permitividad (ϵ) que posea dicho material influirá en la respuesta que genere el RAR.

Serán empleadas las 4 geometrías (cuadrado, círculo, triángulo, omega) tomando en cuenta que los resultados vistos en el capítulo anterior se obtuvieron con el RAR en contacto con aire, por lo que los resultados variarán de acuerdo al material colocado como capa superior.

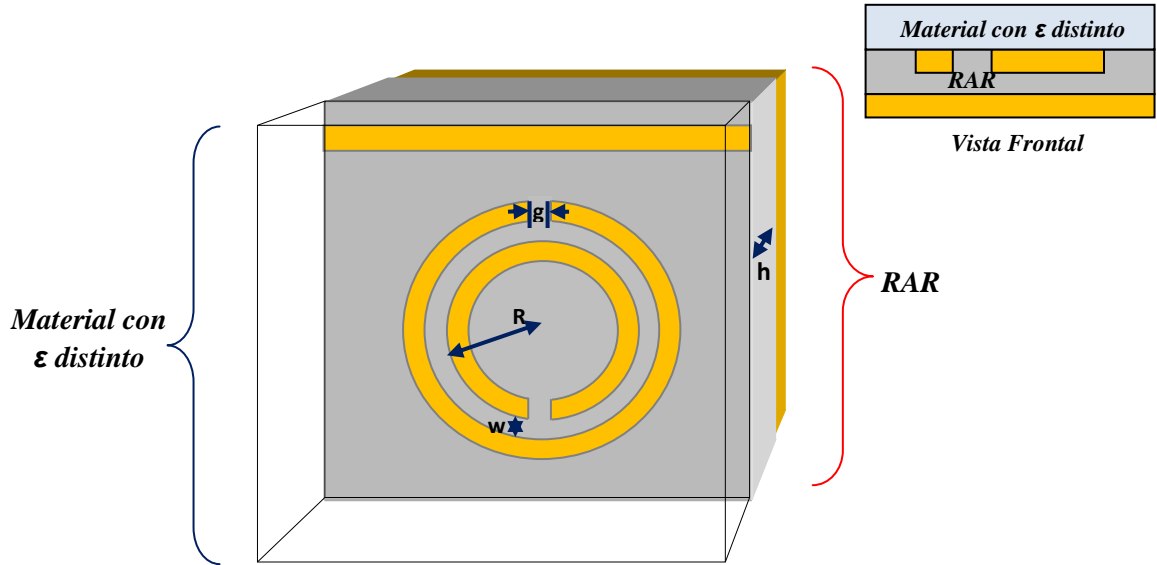


Figura. 37. Estructura de RAR circular en contacto con otro medio.

5.2 Descripción general de la permitividad

La permitividad puede definirse como la capacidad que posee un material para ser polarizado por un campo eléctrico y su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Faradio por metro (F/m).

Para conocer la constante dieléctrica, también conocida como permitividad relativa, de un material se hace una relación entre su permitividad (ϵ) y la permitividad del vacío ($\epsilon_0 = 8.8541878176 \times 10^{12} F/m$):

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (55)$$

Si se quiere obtener la permitividad absoluta del material en cuestión se puede calcular multiplicando la permitividad relativa por la permitividad del vacío:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (56)$$

En la Tabla 3 [23] se presenta una lista de materiales dieléctricos y aislantes comunes con los valores de su permitividad relativa. Cabe mencionar que estos valores son válidos en condiciones normales de temperatura ($20^\circ - 25^\circ C$).

MATERIAL	PERMITIVIDAD ϵ_r
Aire	1.0005
Alcohol Etílico	25
Óxido de Aluminio	8.8
Ámbar	2.7
Baquelita	4.74
Titanio de Bario	1200
Dióxido de Carbono	1.001
Ferrita (NiZn)	12.4
Germanio	16
Vidrio	4 – 7
Hielo	4.2
Mica	5.4
Neopreno	6.6
Nailon	3.5
Papel	3
Plexiglás	3.45
Polietileno	2.26
Polipropileno	2.25
Poliestireno	2.56
Porcelana (Proceso Seco)	6
Piranol	4.4
Vidrio Pyrex	4
Cuarzo (Fundido)	3.8
Hule	2.5 – 3
Sílice o SiO ₂ (Fundida)	3.8
Silicio	11.8
Nieve	3.3
Cloruro de Sodio	5.9

Tierra (Seca)	2.8
Esteatita	5.8
Styrofoam	1.03
Teflón	2.1
Dióxido de Titanio	100
Agua (Destilada)	80
Agua (Deshidratada)	1
Madera (Seca)	1.5 - 4

TABLA 3. Permitividad relativa de distintos materiales comunes.

Por otro lado, si se requiere utilizar la piel como medio de contacto hay que tomar en cuenta que la permitividad de la misma será distinta dependiendo de la frecuencia que se le aplique a ella. En la Tabla 4 [24] se muestra un ejemplo de valores que toma la permitividad de la piel a distintas frecuencias.

FRECUENCIA (GHz)	PERMITIVIDAD ϵ_r
10	31.3
11	30.3
12	29.3
13	28.3
14	27.4
15	26.4
16	25.5
17	24.5
18	23.6
19	22.8
20	22
21	21.2
22	20.4
23	19.7

24	19
25	18.3
26	17.7
27	17.1
28	16.6
29	16
30	15.5

TABLA 4. Permitividad relativa de la piel a distintas frecuencias.

5.3 Resultados

En la realización de este trabajo se hace uso del Resonador de Anillo Ranurado (dimensiones en Tabla 2) al cual se le coloca una capa que posee una permitividad diferente a la del aire, con el fin de presentar el RAR como sensor. Para la obtención de estos resultados se emplean 3 tipos de análisis:

- Localización de frecuencias de resonancia: Se podrá conocer el comportamiento de cada uno de los materiales utilizados de acuerdo al posicionamiento que obtiene.
- Magnitud: Se compara la magnitud de la amplitud de cada una de las frecuencias por material.
- Ancho espectral: Se realiza el cálculo del rango de frecuencias entre los cuatro materiales empleados, el cual se representa como Δ_f .

5.3.1 Geometría cuadrada

En la figura 38 se muestra la respuesta obtenida en la reflexión del RAR cuadrado al estar en contacto con materiales de distinta permitividad. En esta ocasión se ha empleado aire, nailon, porcelana y piel como material. Al comparar los resultados de reflexión de los cuatro se obtiene un ancho espectral $\Delta_f = 1.88\text{GHz}$.

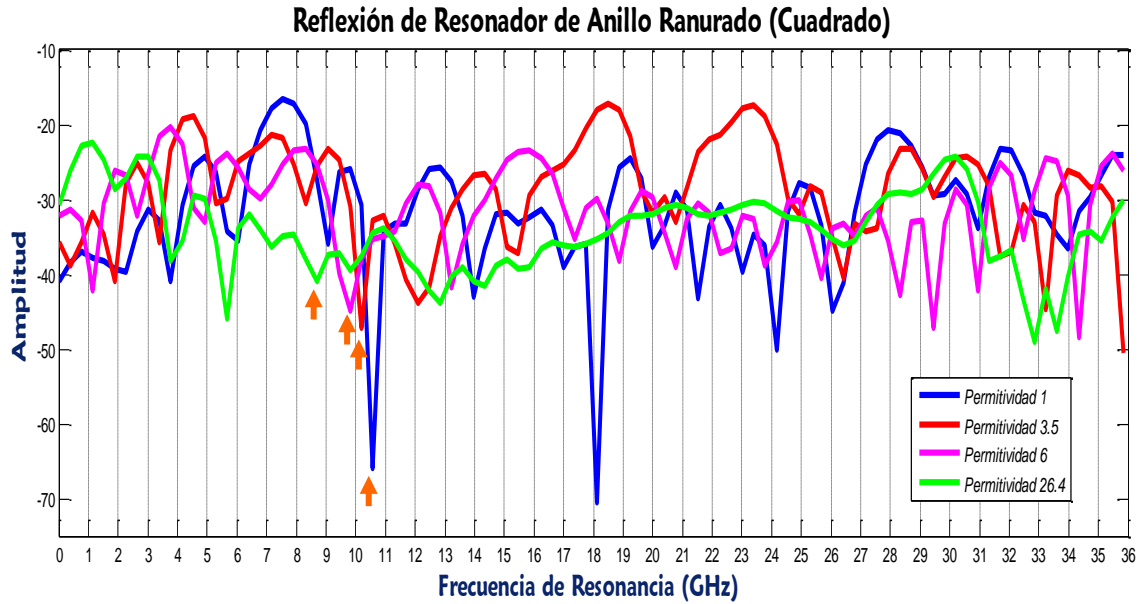


Figura. 38. Comparación de reflexión de estructura de RAR cuadrada.
 $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

En la figura 39 se presenta la transmisión obtenida con esta geometría con los valores de permitividad antes mencionados, donde $\Delta_f = 3.39\text{GHz}$ y la localización de las frecuencias para $\epsilon=1$ y $\epsilon=3.5$ es la misma.

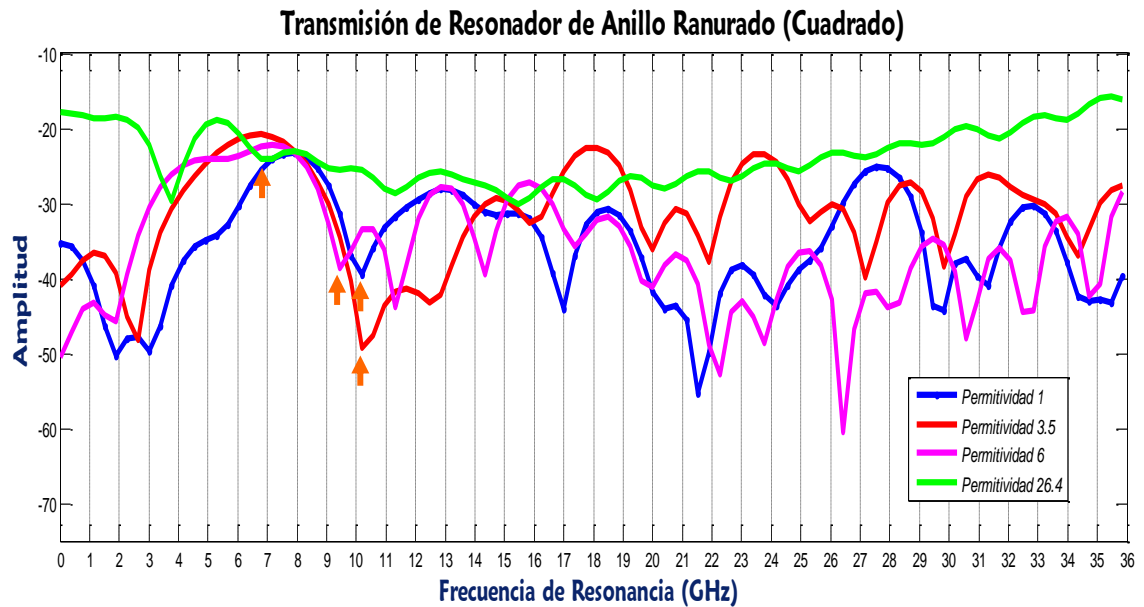


Figura. 39. Comparación de transmisión de estructura de RAR cuadrada.
 $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

5.3.2 Geometría circular

La respuesta de reflexión obtenida para un Resonador de Anillo Ranurado Circular empleando como material de contacto aire, nailon, porcelana y piel se muestra en la figura 40. Para esta geometría se tiene un ancho espectral $\Delta_f = 5.285\text{GHz}$, siendo la frecuencia obtenida con la piel la más baja entre las cuatro.

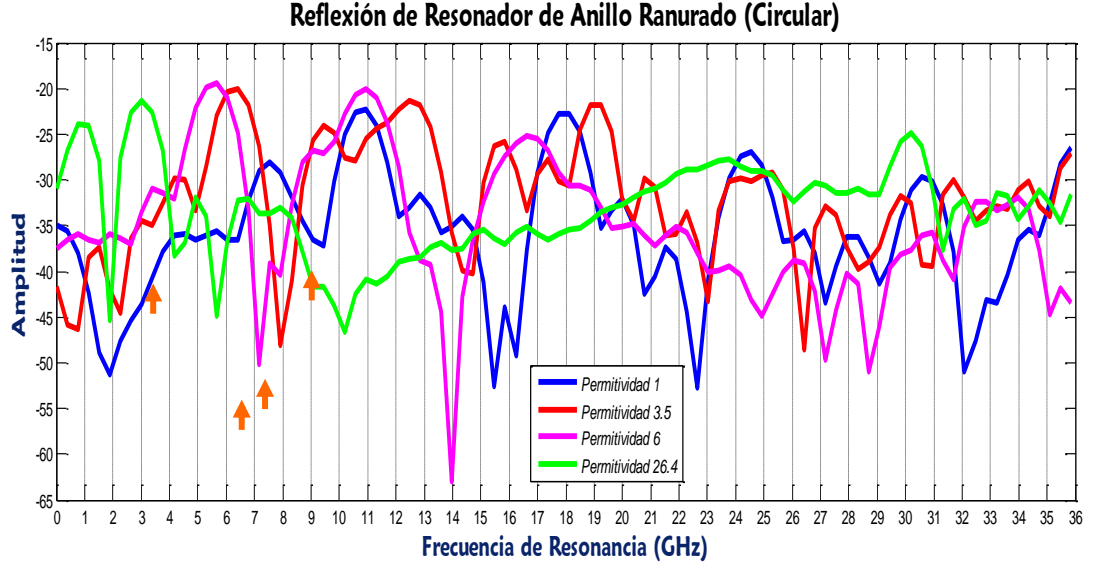


Figura. 40. Comparación de reflexión de estructura de RAR circular.

$\varepsilon = 1$ (Aire); $\varepsilon = 3.5$ (Nailon); $\varepsilon = 6$ (Porcelana); $\varepsilon = 26.4$ (Piel)

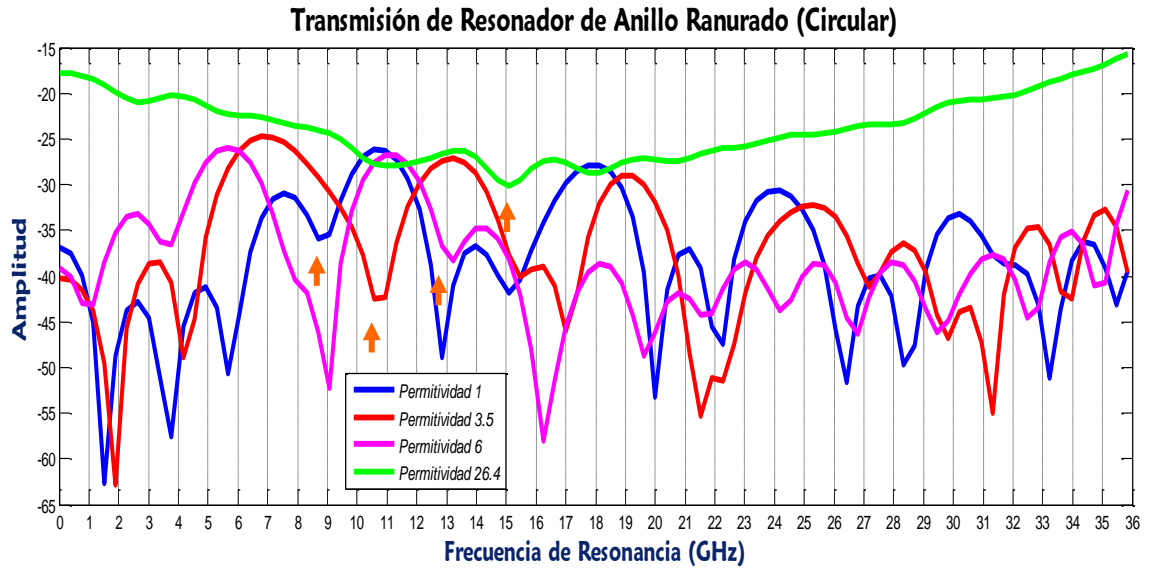


Figura. 41. Comparación de transmisión de estructura de RAR circular.

$\varepsilon = 1$ (Aire); $\varepsilon = 3.5$ (Nailon); $\varepsilon = 6$ (Porcelana); $\varepsilon = 26.4$ (Piel)

En la figura 41 se presenta una comparación de las frecuencias de transmisión obtenida con los distintos valores de permitividad empleados. El ancho espectral para la transmisión es $\Delta_f = 1.73\text{GHz}$.

5.3.3 Geometría triangular

Para el caso del Resonador de Anillo Ranurado Triangular se presenta la figura 42 donde se ilustra la respuesta de reflexión obtenida para $\epsilon=1$, $\epsilon=3.5$, $\epsilon=6$, $\epsilon=26.4$ y el ancho espectral que posee es de 3.39GHz .

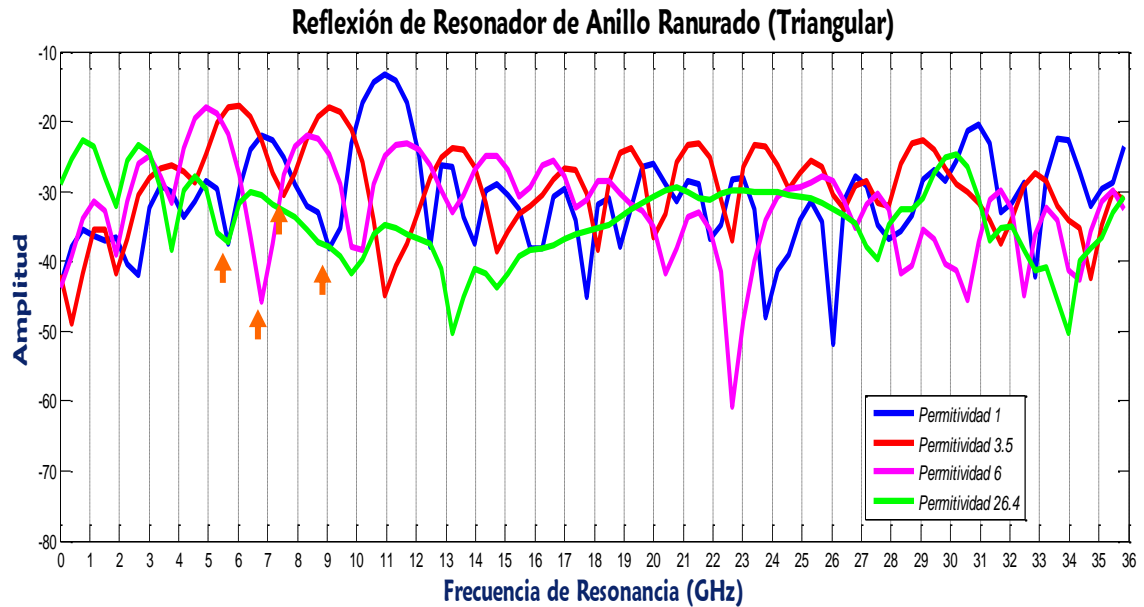


Figura. 42. Comparación de reflexión de estructura de RAR triangular.

$\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

La figura 43 presenta ahora la transmisión del Resonador de Anillo Ranurado Triangular obtenida con los diversos valores de permitividad mencionados para la capa superior, obteniendo con ello un ancho espectral $\Delta_f = 7.17\text{GHz}$. En este caso la localización de frecuencias del nailon y la porcelana se ubican en el mismo sitio.

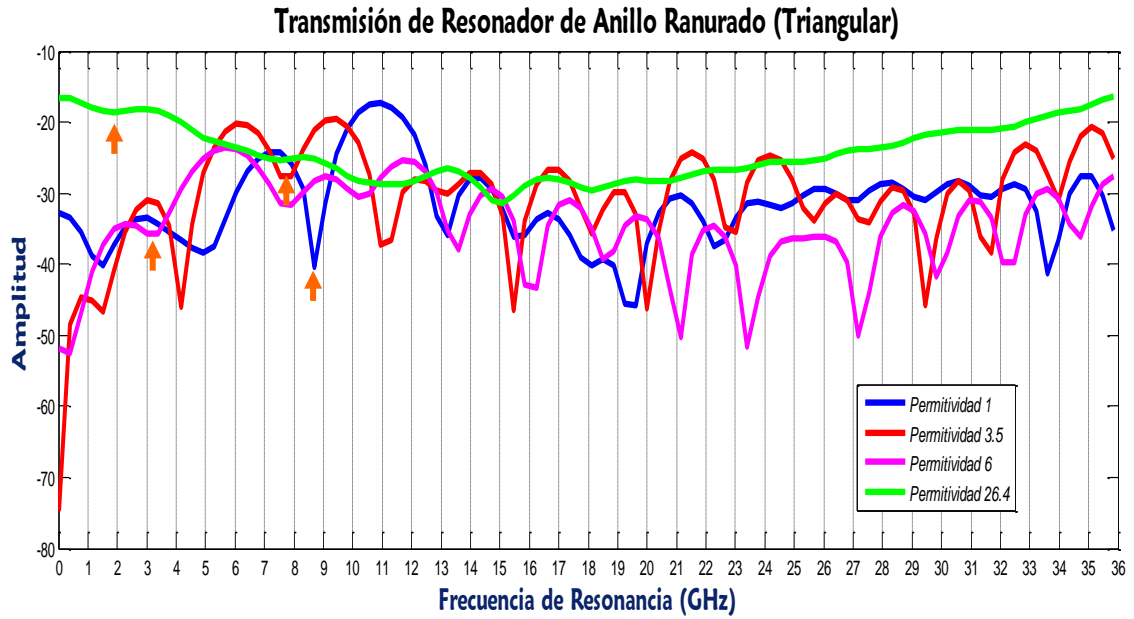


Figura. 43. Comparación de transmisión de estructura de RAR triangular.

$\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

5.3.4 Geometría omega

Para la última geometría se presenta la respuesta en la reflexión a las distintas variaciones de materiales en contacto con el Resonador de Anillo Ranurado Omega. Su ancho espectral es de $\Delta_f = 6.79\text{GHz}$.

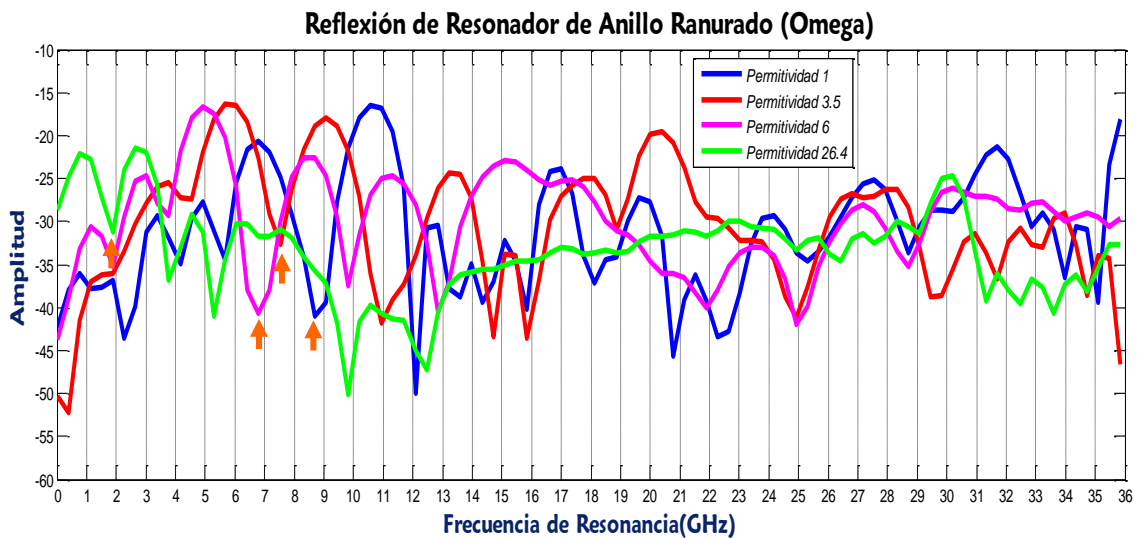


Figura. 44. Comparación de reflexión de estructura de RAR omega.

$\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

De igual manera; en la figura 45 se muestra la respuesta obtenida del Resonador de Anillo Ranurado Omega en su transmisión, teniendo un ancho espectral de $\Delta_f = 7.17\text{GHz}$. En esta ocasión la piel genera la frecuencia más baja.

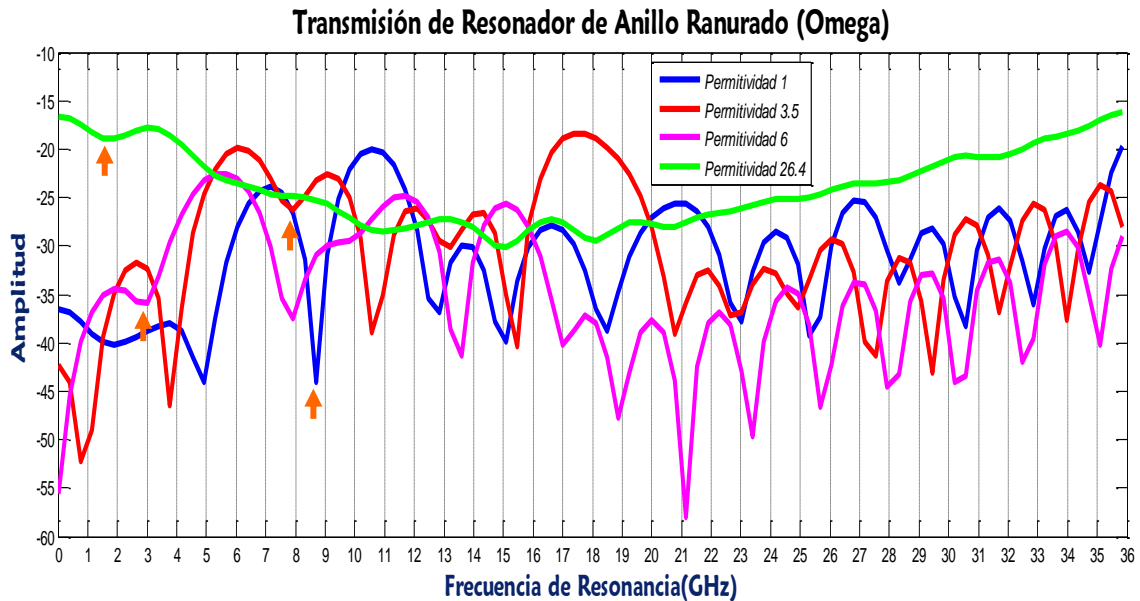


Figura. 45. Comparación de transmisión de estructura de RAR omega.
 $\epsilon=1$ (Aire); $\epsilon=3.5$ (Nailon); $\epsilon=6$ (Porcelana); $\epsilon=26.4$ (Piel)

En las cuatro geometrías, tanto en reflexión como en transmisión, se ha presentado un corrimiento hacia la izquierda en la frecuencia así como variaciones en la amplitud de las mismas, esto dependiendo del valor de la permitividad que se aplique a ellas.

5.4 Comparación entre espesores de capa superior

En esta sección se presenta el comportamiento en cada una de las geometrías al estar en contacto con un material, variando en éste su espesor.

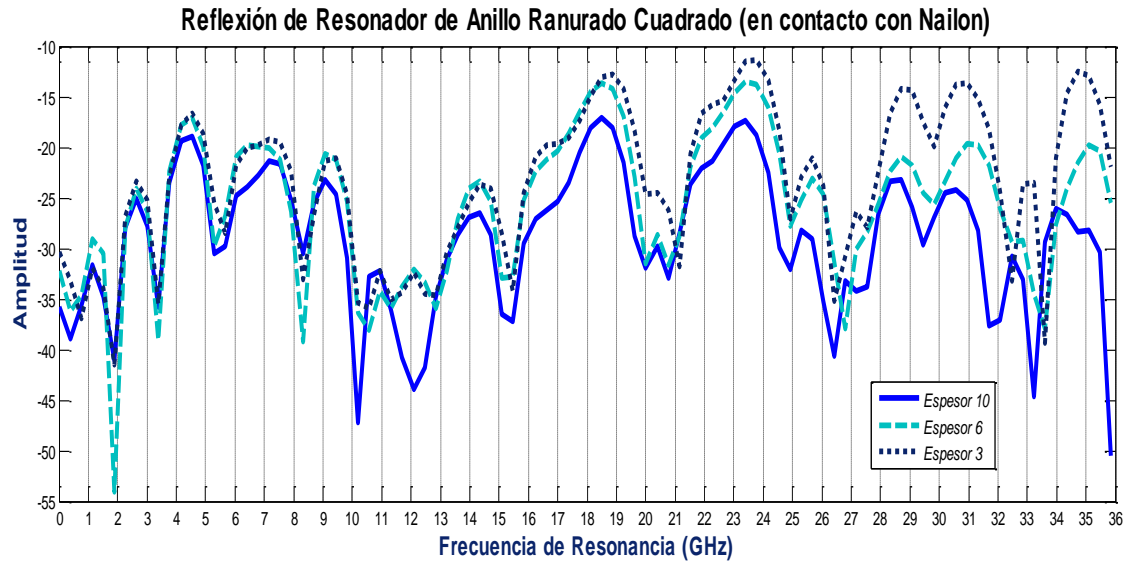
5.4.1 Geometría cuadrada

5.4.1.1 En contacto con nailon

La figura 46 presenta una comparación de la respuesta obtenida en un RAR cuadrado empleando tres distintos espesores en la capa superior

conformada de nailon con un valor de permitividad $\varepsilon = 3.5$. Tanto en reflexión, **a)**, como en transmisión, **b)**, existe un aumento en la amplitud conforme incrementa el espesor del material, manteniendo la posición de las frecuencias en los tres espesores.

a)



b)

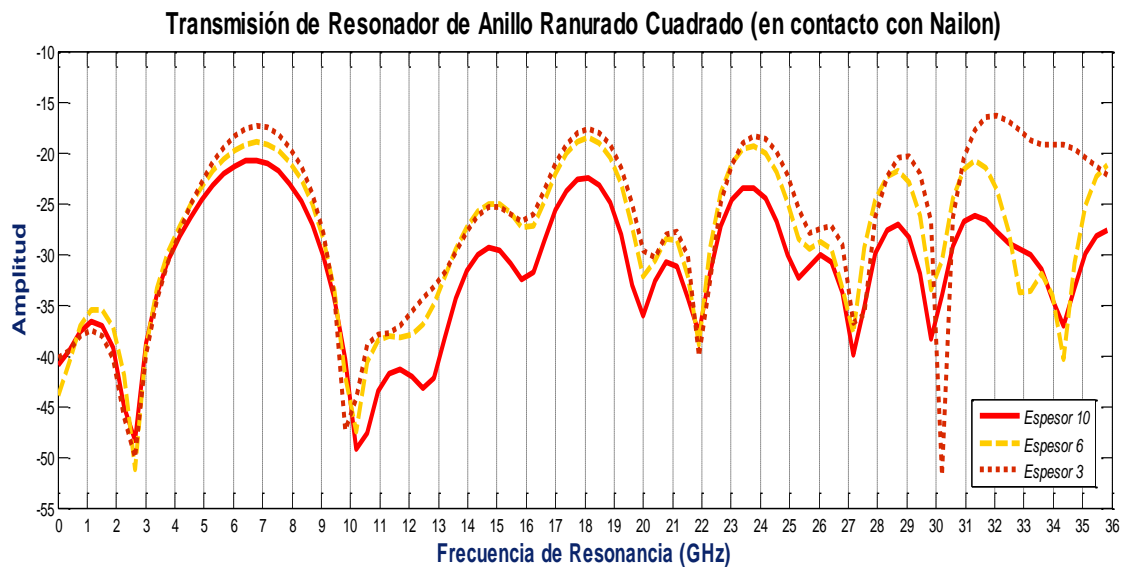
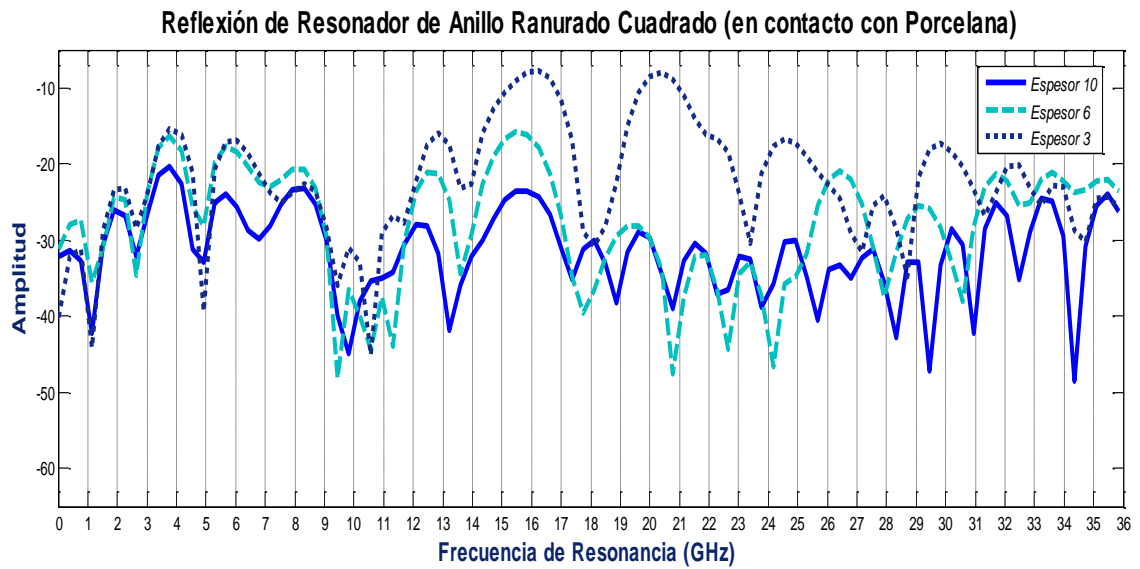


Figura. 46. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR cuadrado en contacto con nailon con distinto espesor.

5.4.1.2 En contacto con porcelana

Como segundo material se utiliza la porcelana con un valor de $\varepsilon = 6$, empleando tres espesores distintos para la misma. Con esto se presenta un aumento en la amplitud al incrementar el valor del espesor del material, pero también un corrimiento en la frecuencia a partir de los 9GHz tanto en reflexión, **a)**, como en transmisión, **b)**, como se ilustra en la figura 47.

a)



b)

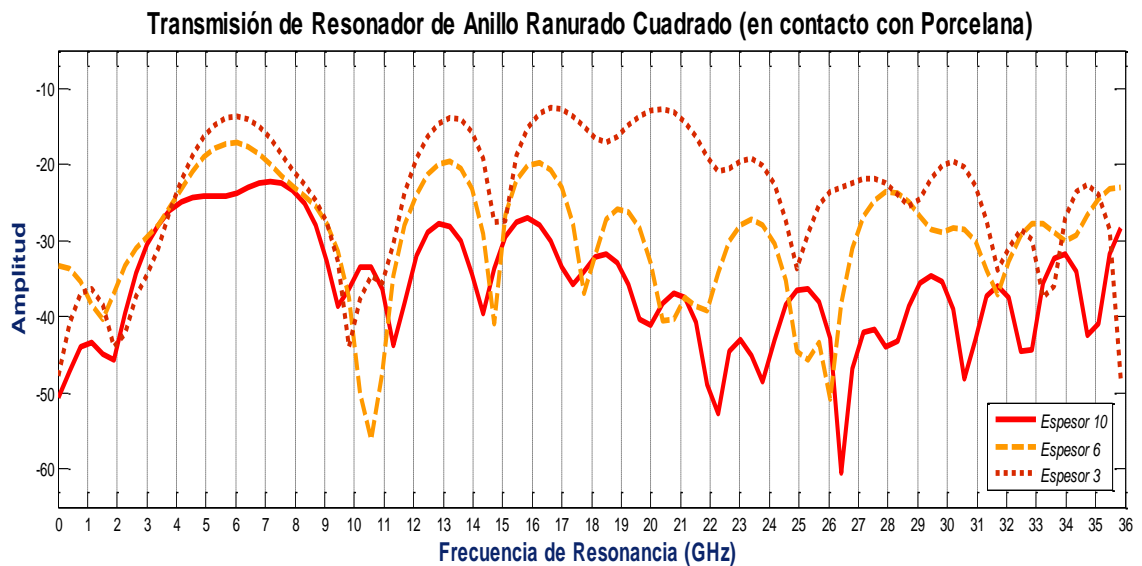
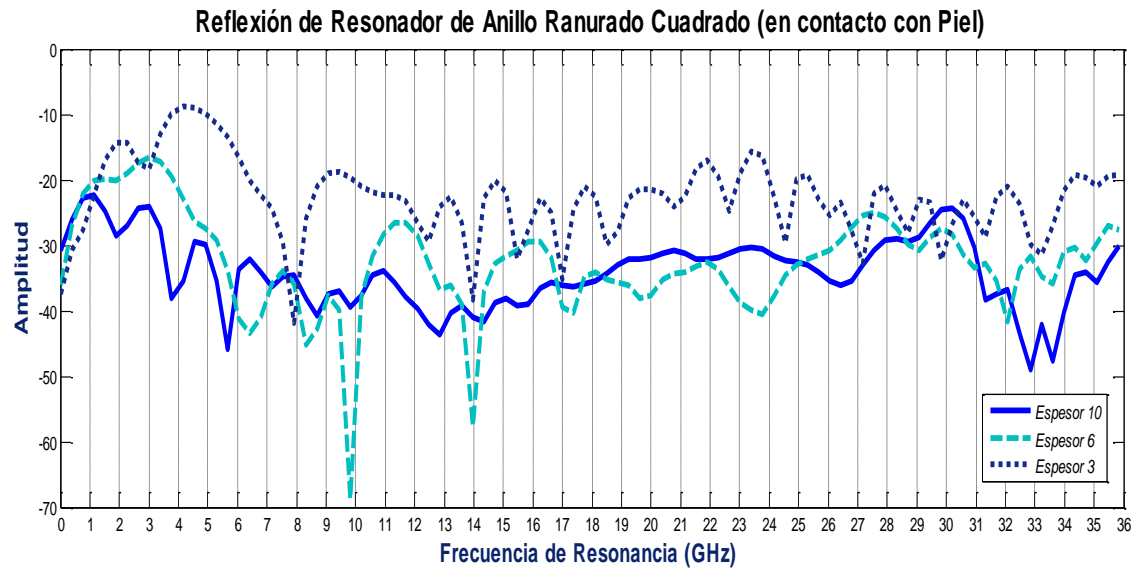


Figura. 47. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR cuadrado en contacto con porcelana con distinto espesor

5.4.1.3 En contacto con piel

En la figura 48 **a)** se ilustra la respuesta que se genera en la reflexión de un RAR cuadrado al estar en contacto con piel que tiene una permitividad de $\epsilon = 26.4$, así mismo, en **b)** se muestra la respuesta que se produce en la transmisión. Al utilizar este material se generan cambios tanto en la amplitud como en las frecuencias de resonancia obtenidas.

a)



b)

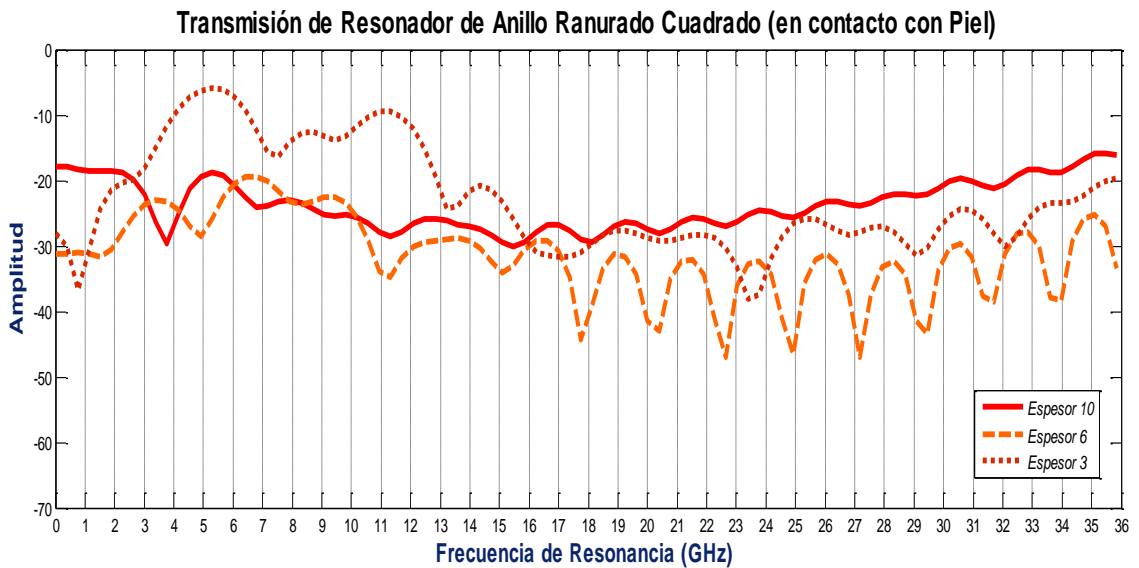


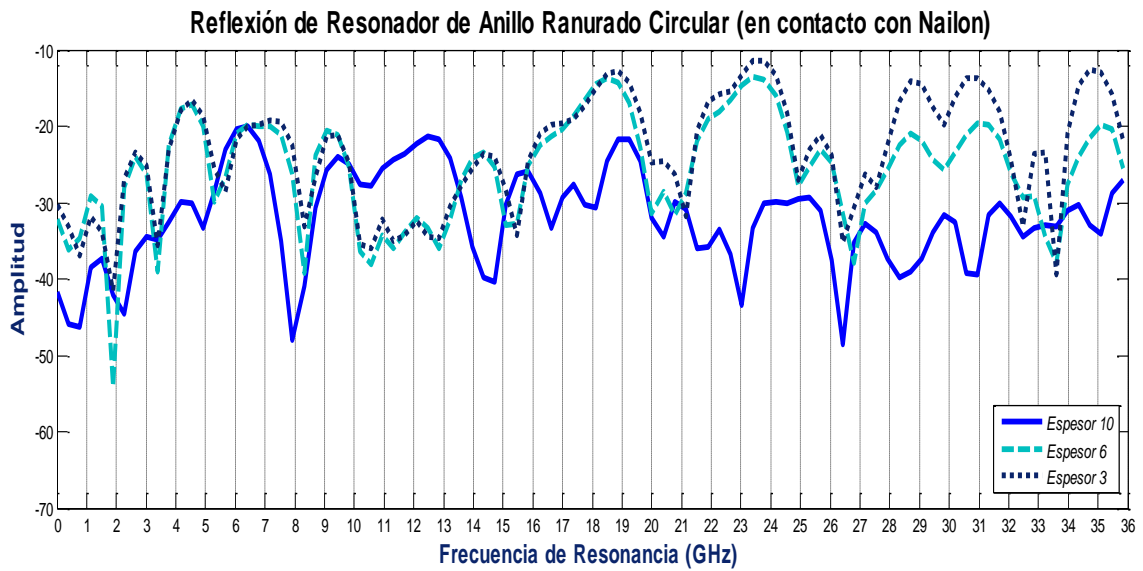
Figura. 48. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR cuadrado en contacto con piel con distinto espesor.

5.4.2 Geometría circular

5.4.2.1 En contacto con nailon

Para el RAR circular se ha empleado una capa superior de nailon con distintos espesores. En la figura 49 se observan los resultados obtenidos para la reflexión y la transmisión, donde las frecuencias cambian su amplitud y/o posición dependiendo del espesor empleado en el material.

a)



b)

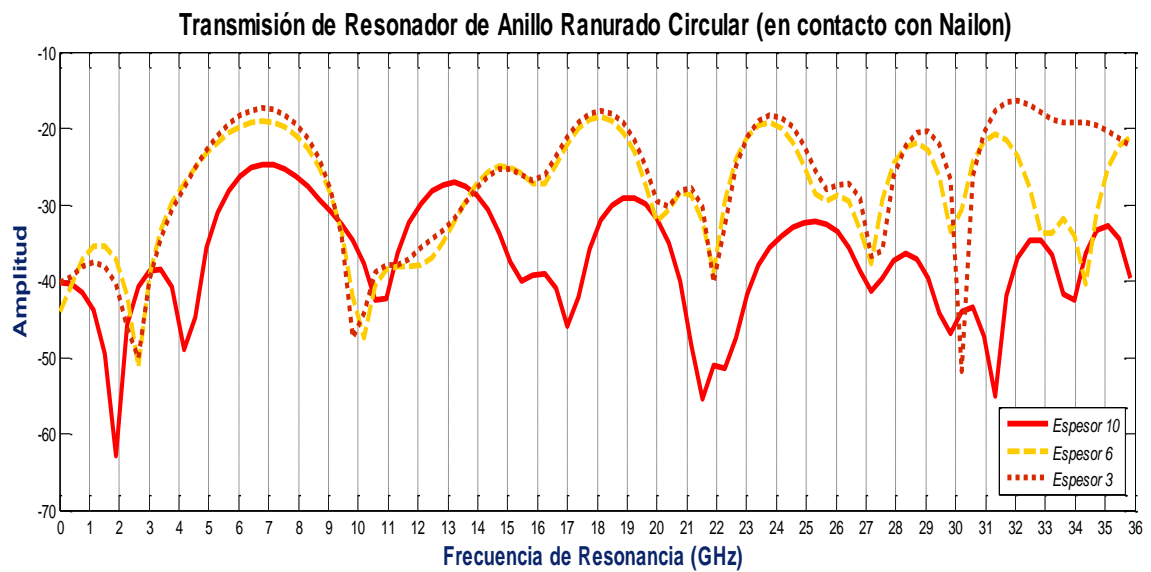
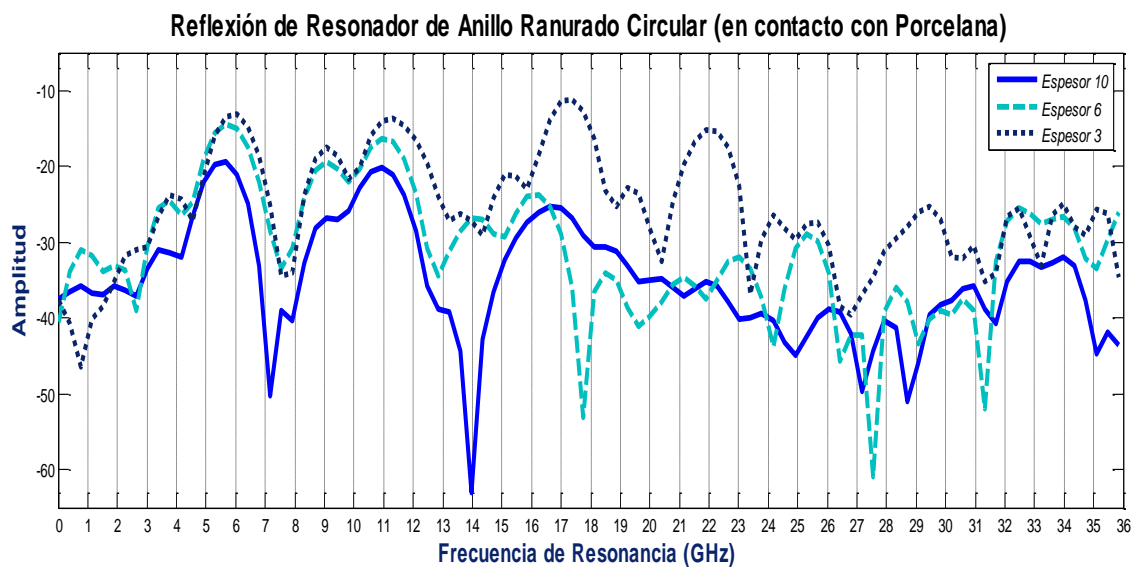


Figura. 49. Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR circular en contacto con nailon con distinto espesor.

5.4.2.2 En contacto con porcelana

En la figura 50 **a)** se ilustra la respuesta obtenida en la reflexión de un RAR circular con una capa superior de $\epsilon = 6$ de distintos espesores, donde los espesores de 0.795mm y 1.59mm presentan una similitud en el rango de frecuencias de 4.5GHz a 13GHz con una diferencia en la amplitud; en cambio para un espesor de 2.65mm se presentan diferencias tanto en amplitud como en la ubicación de las frecuencias. La figura 50 **b)** muestra la respuesta en la transmisión donde los tres espesores presentan una igualdad en las frecuencias de 0 a 13GHz diferenciando solamente la amplitud en cada uno de ellos.

a)



b)

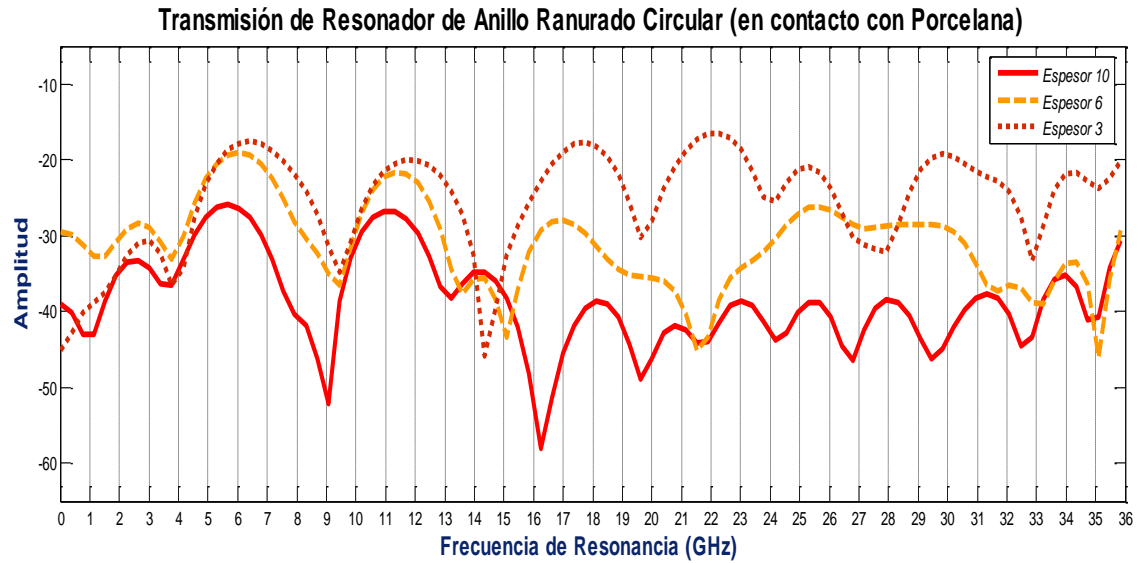
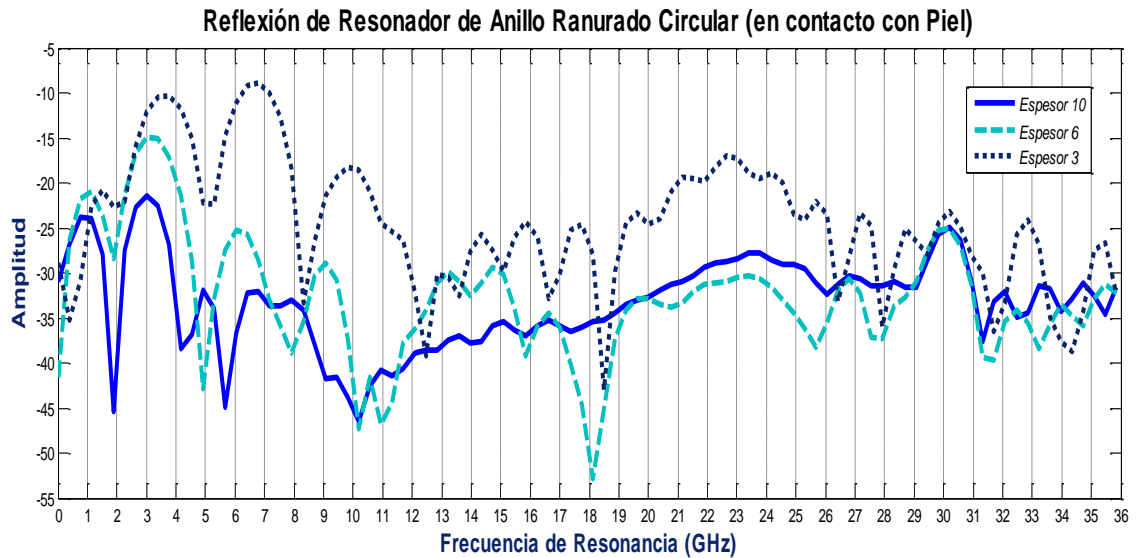


Figura. 50. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR circular en contacto con porcelana con distinto espesor.

5.4.2.3 En contacto con piel

El tercer material empleado en el RAR circular es la piel, el cual se muestra su respuesta en la figura 51, donde en **a)** la reflexión presenta una igualdad de frecuencias en los tres espesores de 0 a 2GHz distinguiéndose en la amplitud unos de otros, y en **b)** la transmisión del RAR presenta distinciones tanto en amplitud como en las frecuencias obtenidas para cada uno de los espesores.

a)



b)

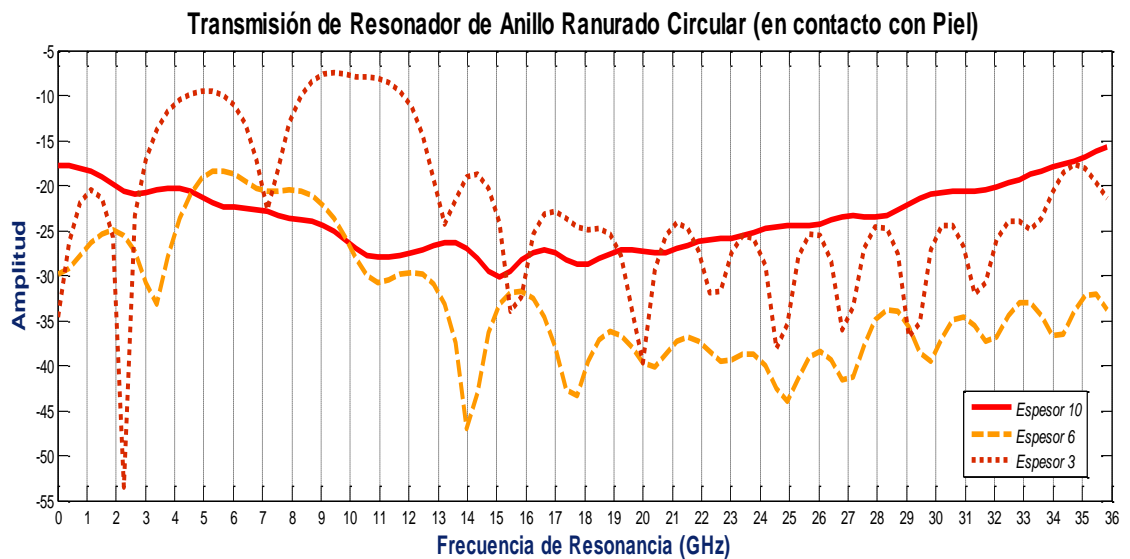


Figura. 51. Comparación de a) reflexión y b) transmisión de estructura de RAR circular en contacto con piel con distinto espesor.

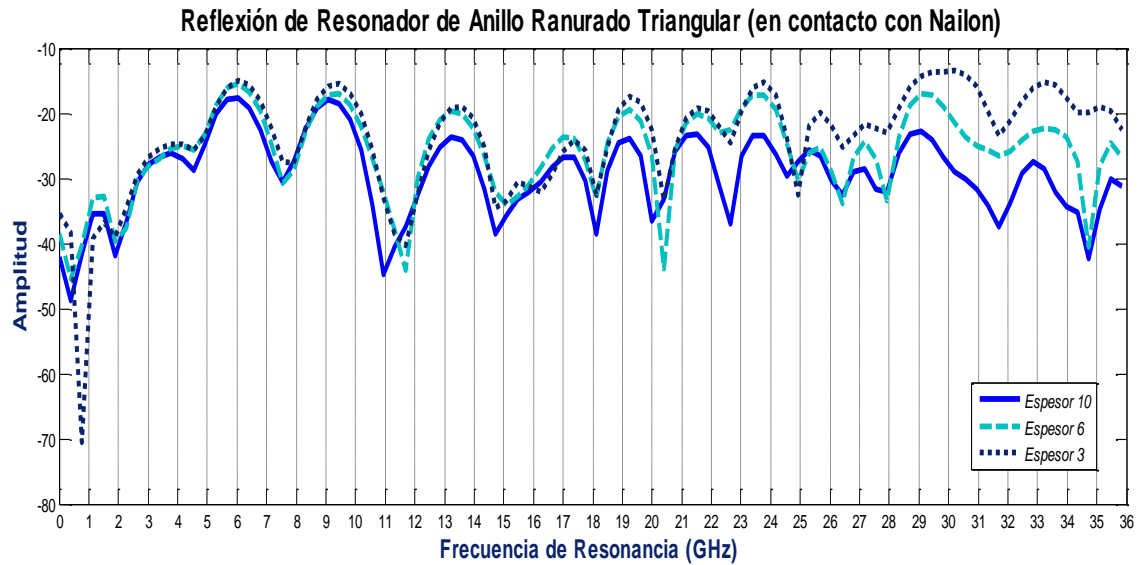
5.4.3 Geometría triangular

5.4.3.1 En contacto con nailon

Para el RAR triangular se ha realizado el mismo procedimiento que en las geometrías anteriores, donde la respuesta de reflexión se ilustra en la figura 52 a) en la cual las frecuencias de resonancia de 0 a 25GHz varían en su

amplitud y la respuesta de transmisión en la figura 52 **b)** presenta el mismo comportamiento de 0 a 23GHz.

a)



b)

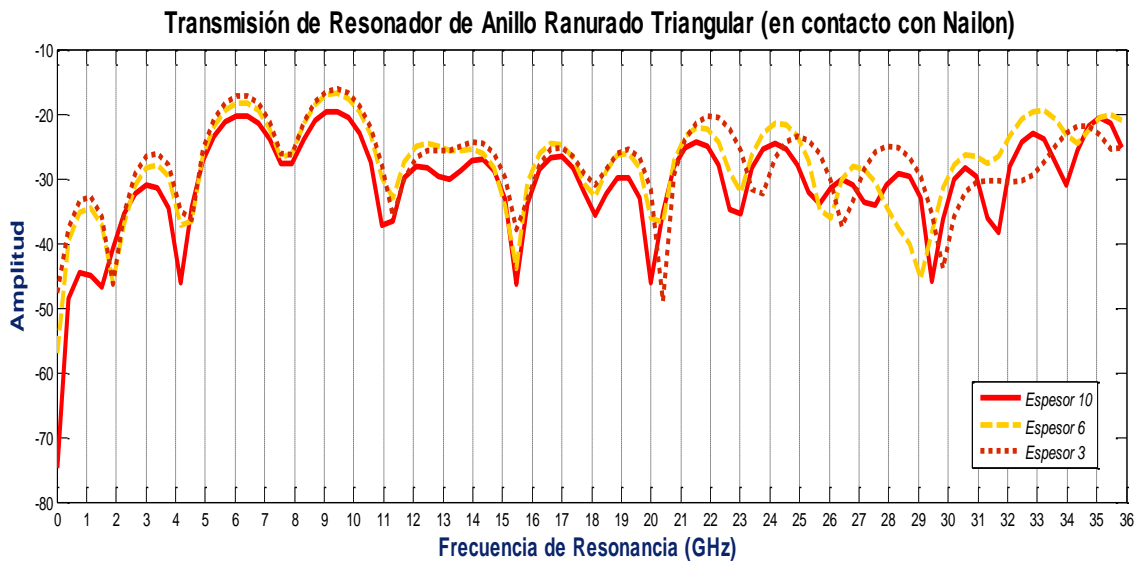


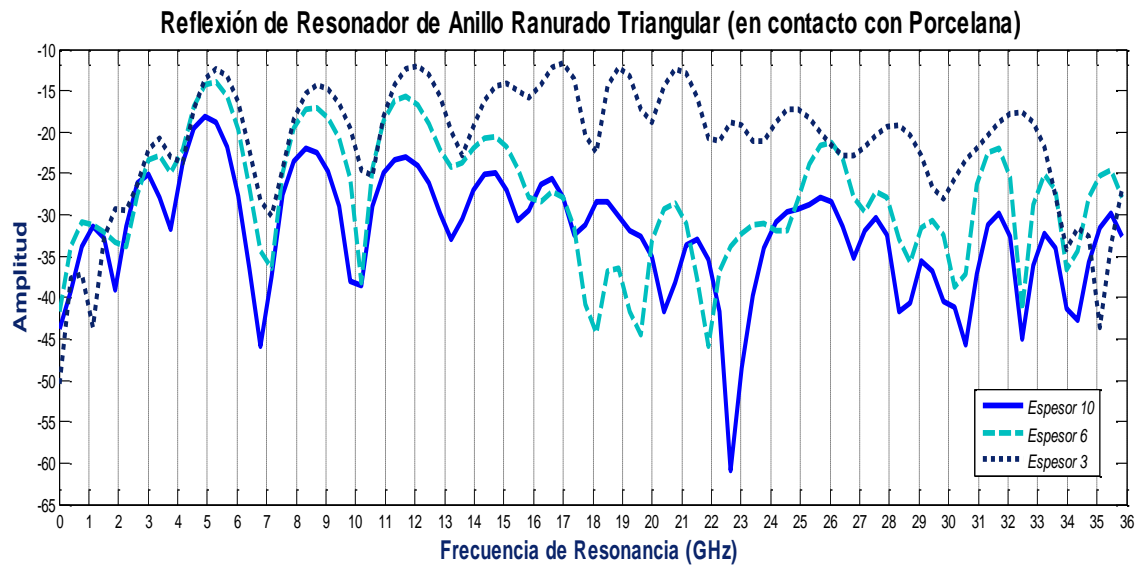
Figura. 52. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con nailon con distinto espesor.

5.4.3.2 En contacto con porcelana

En la figura 53 se muestra la respuesta obtenida para un RAR triangular en contacto con porcelana en sus tres espesores.

En **a)** se presenta la reflexión donde, a partir de la frecuencia de 13GHz, el comportamiento varía tanto en amplitud como en posición de las frecuencias. En **b)** la transmisión de la estructura presenta una variación en la amplitud de sus frecuencias de acuerdo al espesor de la capa superior.

a)



b)

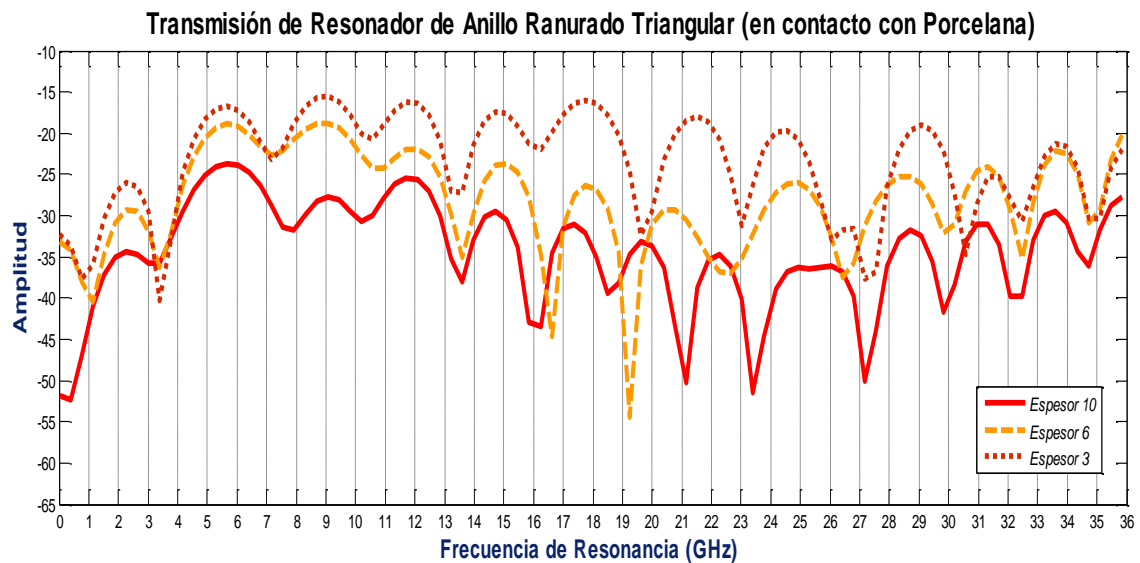
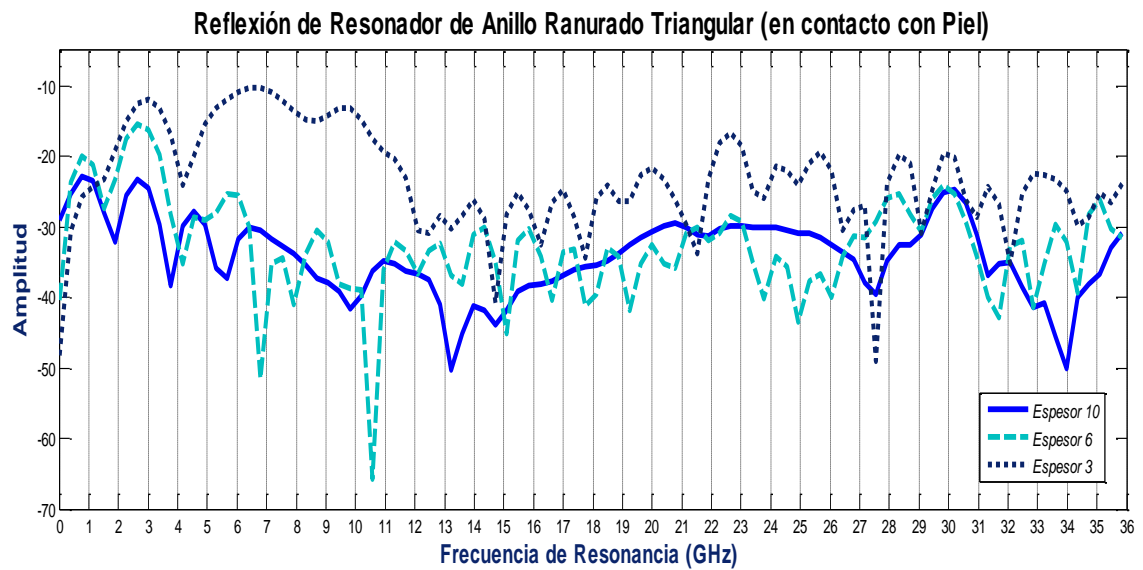


Figura. 53. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con porcelana con distinto espesor.

5.4.3.3 En contacto con piel

Para una capa superior de piel se presenta, en la figura 54, la respuesta de reflexión, **a)**, y transmisión, **b)**, presentan variaciones tanto en amplitud y valor de las frecuencias de resonancia para los tres espesores.

a)



b)

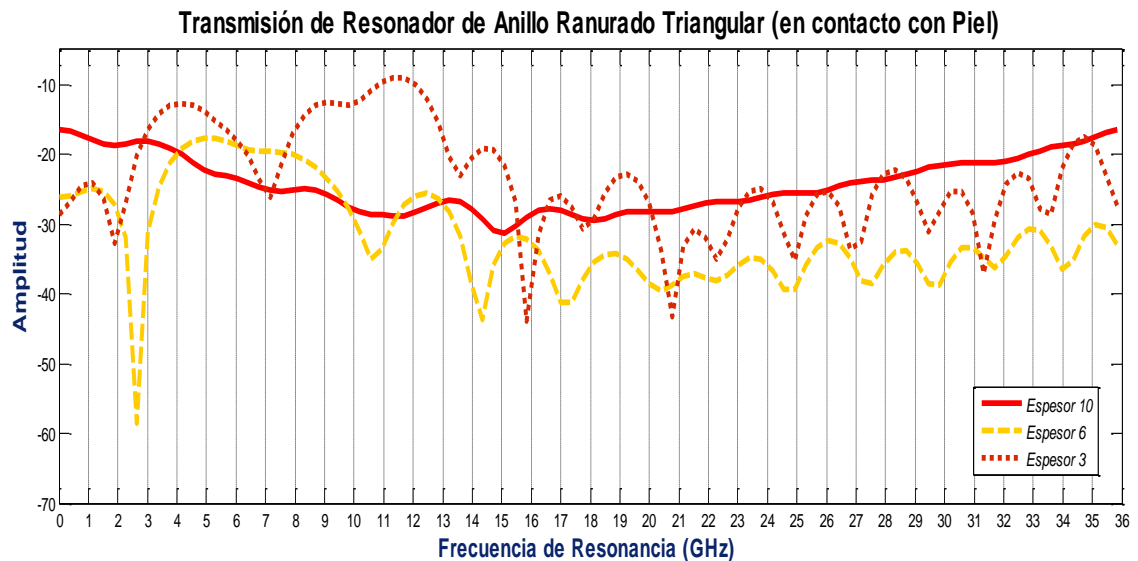


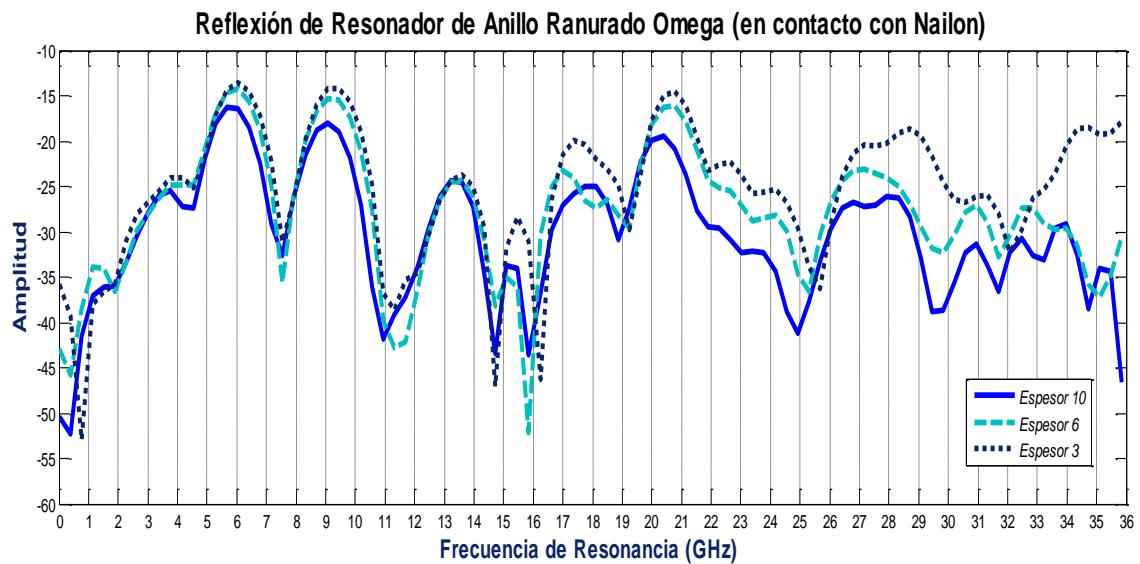
Figura. 54. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR triangular en contacto con piel con distinto espesor.

5.4.4 Geometría omega

5.4.4.1 En contacto con nailon

Para el caso del RAR omega en contacto con nailon ilustrado en la figura 55, tanto reflexión como transmisión presentan únicamente una variación en la amplitud de sus frecuencias, siendo el espesor de 2.65mm el de mayor amplitud.

a)



b)

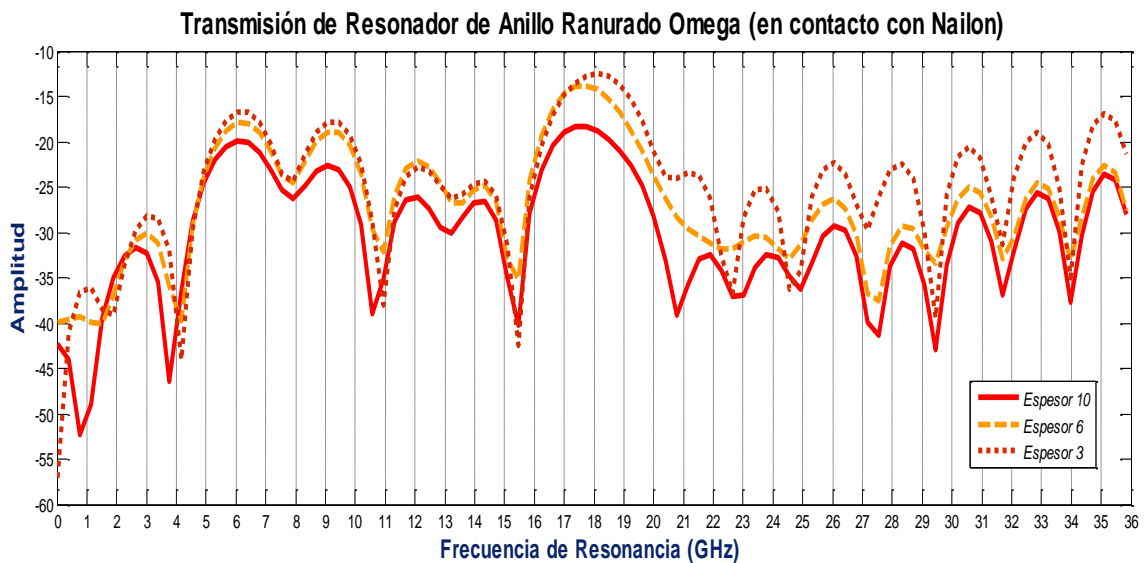
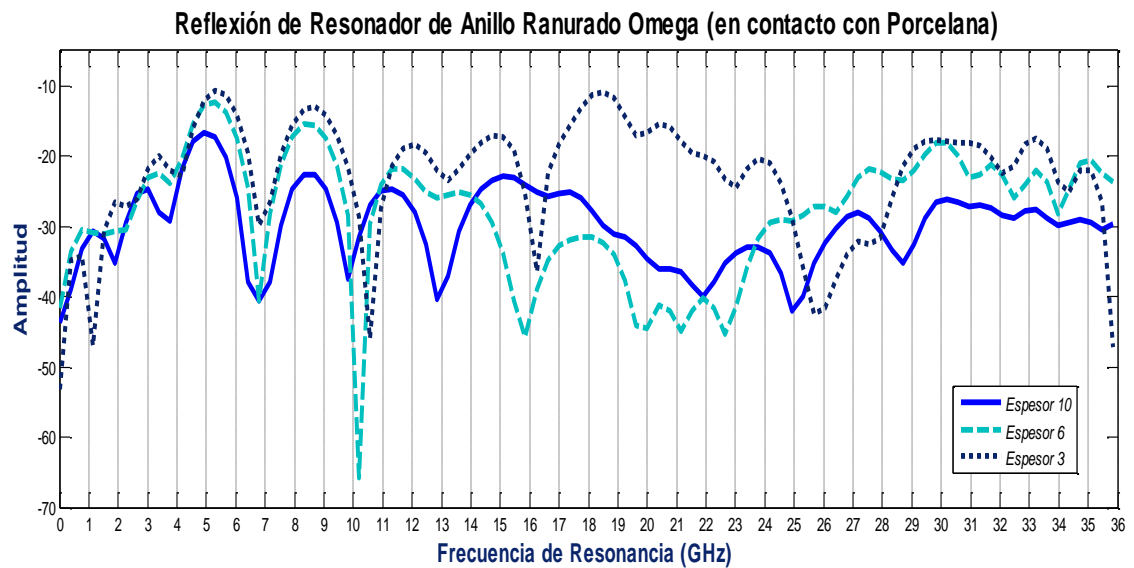


Figura. 55. Comparación de a) reflexión y b) transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con nailon con distinto espesor.

5.4.4.2 En contacto con porcelana

La figura 56 **a)** muestra la comparación de la respuesta obtenida en los tres espesores de porcelana, en donde, a partir de los 13GHz existe un corrimiento en las frecuencias además del cambio de amplitud de las mismas; en la transmisión ocurre lo mismo como se ilustra en **b)**.

a)



b)

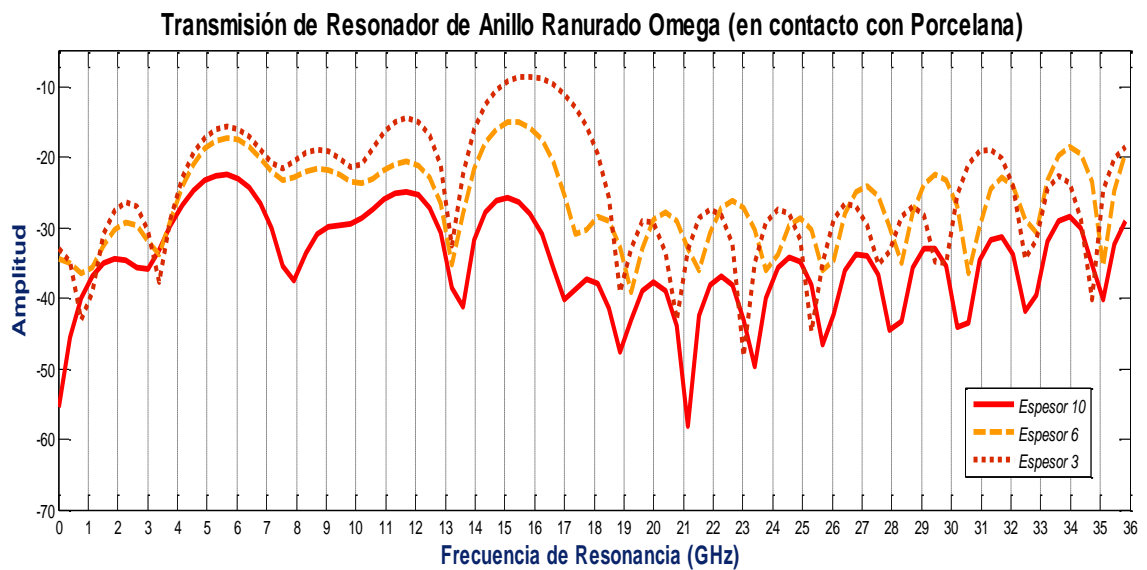
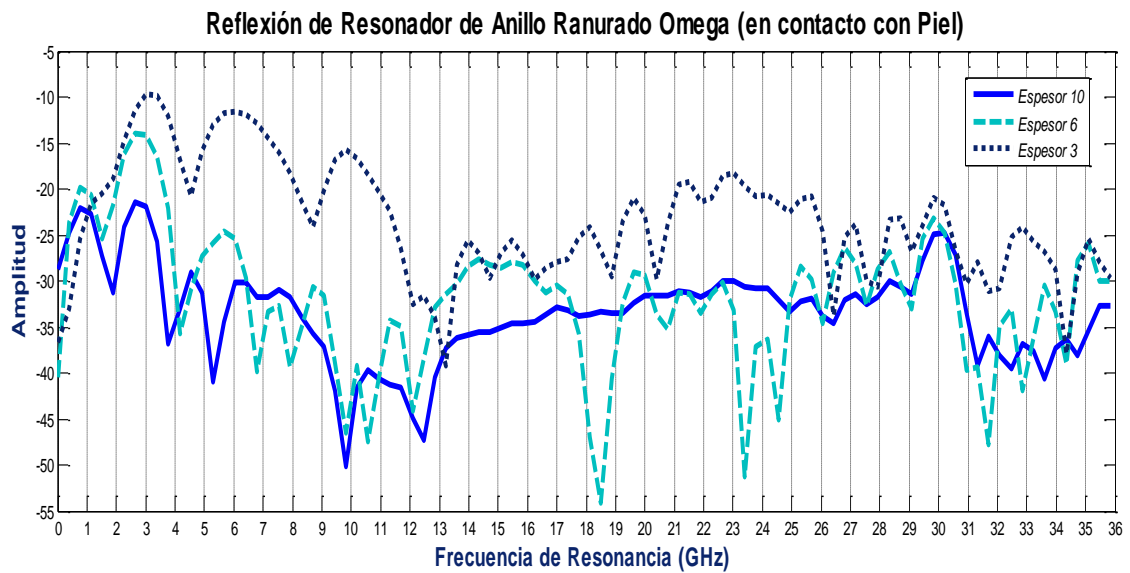


Figura. 56. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con porcelana con distinto espesor.

5.4.4.3 En contacto con Piel

Por último, en la figura 57, se presenta la respuesta a la reflexión en **a)** y la respuesta de transmisión en **b)**, donde el espesor de 2.65mm presenta una mínima amplitud como ocurre en el RAR de geometría cuadrada, circular y triangular presentadas anteriormente.

a)



b)

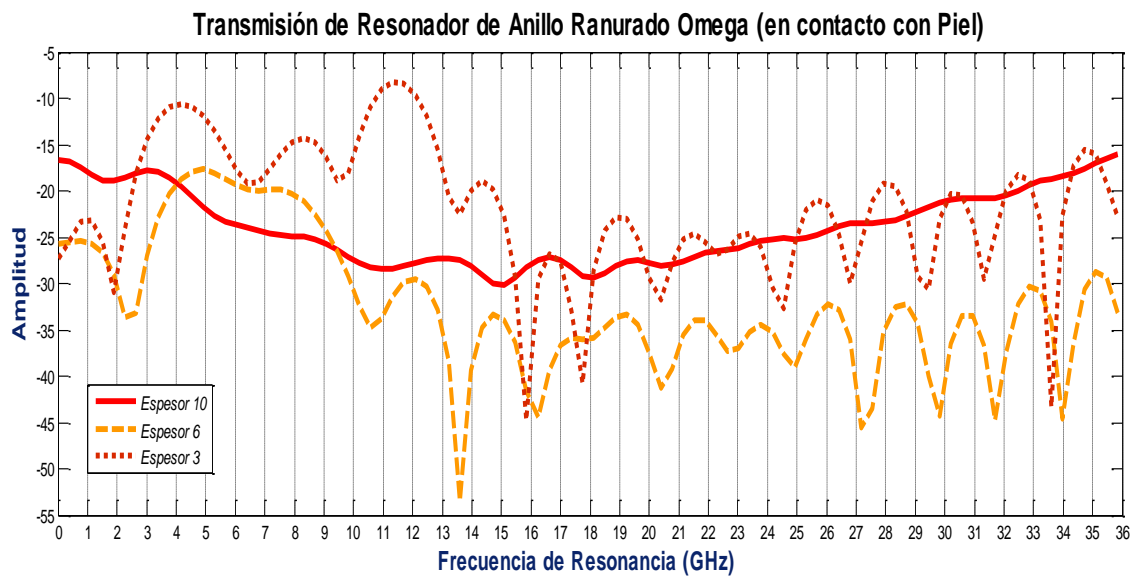


Figura. 57. Comparación de **a)** reflexión y **b)** transmisión de la estructura de RAR omega en contacto con piel con distinto espesor.

5.5 Anexo: Análisis para la comparación

SRR Cuadrado -- Reflexión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	65.99	10.57
Rojo ($\epsilon=3.5$)	47.25	10.19
Magenta ($\epsilon=6$)	44.89	9.81
Verde ($\epsilon=26.4$)	40.88	8.68

SRR Cuadrado -- Transmisión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	39.58	10.19
Rojo ($\epsilon=3.5$)	49.2	10.19
Magenta ($\epsilon=6$)	38.58	9.43
Verde ($\epsilon=26.4$)	24.07	6.79

SRR Circular -- Reflexión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	37.25	9.43
Rojo ($\epsilon=3.5$)	48.04	7.92
Magenta ($\epsilon=6$)	50.15	7.17
Verde ($\epsilon=26.4$)	38.34	4.15

SRR Circular -- Transmisión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	35.94	8.68
Rojo ($\epsilon=3.5$)	42.48	10.57
Magenta ($\epsilon=6$)	36.77	12.83
Verde ($\epsilon=26.4$)	30.15	15.1

SRR Triangular -- Reflexión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	38	9.06
Rojo ($\epsilon=3.5$)	27.62	7.55
Magenta ($\epsilon=6$)	45.87	6.79
Verde ($\epsilon=26.4$)	37.22	5.66

SRR Triangular -- Transmisión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	40.34	8.68
Rojo ($\epsilon=3.5$)	27.61	7.55
Magenta ($\epsilon=6$)	35.67	3.39
Verde ($\epsilon=26.4$)	18.45	1.51

SRR Omega -- Reflexión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	41.02	8.68
Rojo ($\epsilon=3.5$)	29.92	7.55
Magenta ($\epsilon=6$)	40.64	6.79
Verde ($\epsilon=26.4$)	31.27	1.88

SRR Omega -- Transmisión		
Localización	Magnitud	Frecuencia (GHz)
Azul ($\epsilon=1$)	44.02	8.68
Rojo ($\epsilon=3.5$)	26.33	7.92
Magenta ($\epsilon=6$)	35.82	3.02
Verde ($\epsilon=26.4$)	18.81	1.51

5.6 Conclusión

Al utilizar los Resonadores de Anillo Ranurado en contacto con un material distinto se ha observado un cambio en el comportamiento de su respuesta lo que nos permite verlo como un sensor, ya que éstos se encuentran en contacto con el material a sensar.

En cada una de las geometrías se presenta, en la mayoría de los casos, un aumento en la amplitud al crecer el espesor del material colocado.

Capítulo 6

ARREGLOS CON RESONADORES DE ANILLO RANURADO

6.1 Arreglos de antenas

Un arreglo de antenas está conformado por la unión de dos o más antenas simples, regularmente iguales y colocadas en la misma dirección, cercanas unas de las otras. El acomodo de estas antenas influirá en la respuesta que se obtenga del mismo, por ejemplo, la capacidad de concentrar la radiación en direcciones deseadas.

A partir del modelado computacional realizado en el capítulo 4 se procede a la realización de arreglos con RAR, en este caso, utilizando la geometría omega.

6.2 Arreglos con RAR omega.

Para mostrar la respuesta que se obtiene al realizar un arreglo con RAR se ha empleado la geometría omega, la cual es una de las estructuras que presenta una mejor respuesta entre las cuatro geometrías bajo estudio.

6.2.1 Arreglo 1

El primer arreglo que se presenta está conformado por cuatro RAR omega iguales, alineados horizontalmente con una separación entre ellos de 0.265mm.

En la figura 58 se ilustra, en **a)**, el arreglo de RAR omega y, en **b)**, la respuesta obtenida al emplear el mismo. En este caso se obtiene una frecuencia de mayor amplitud a los 26GHz en la parte de transmisión.

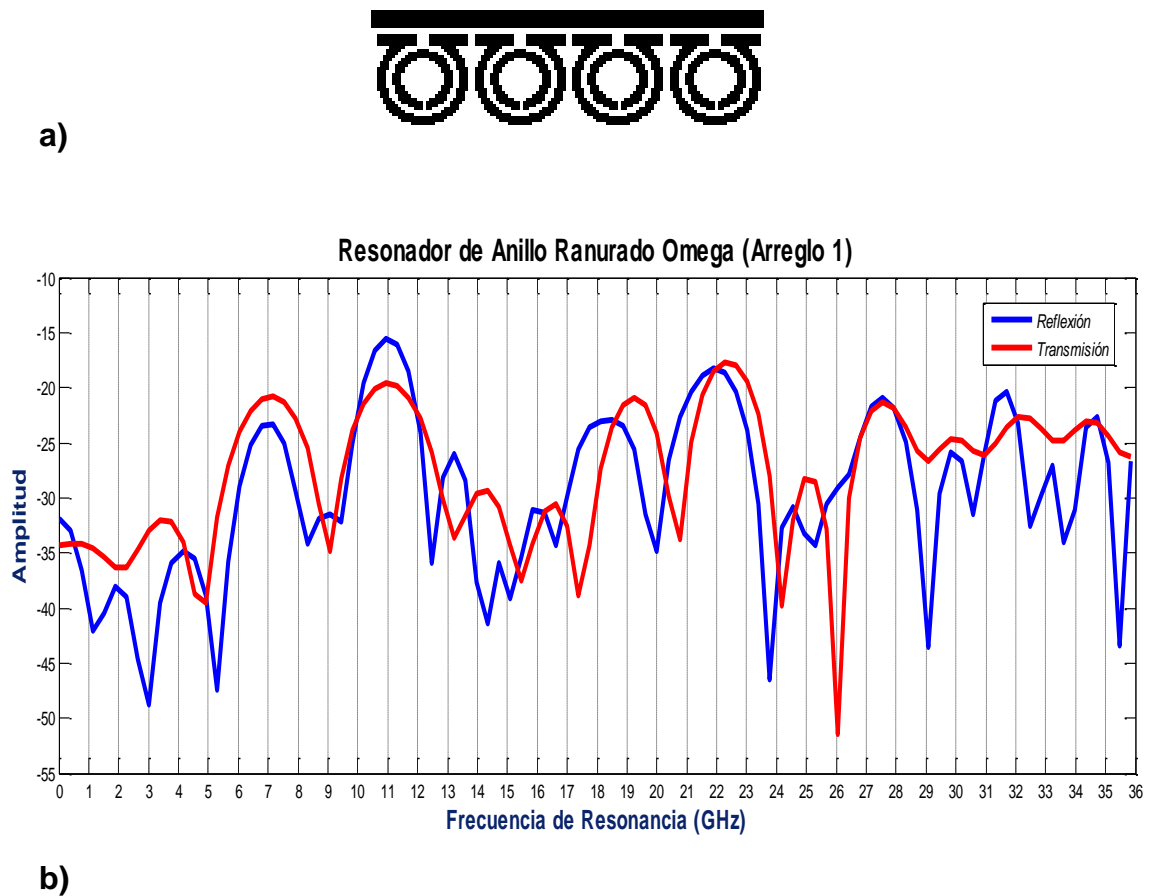
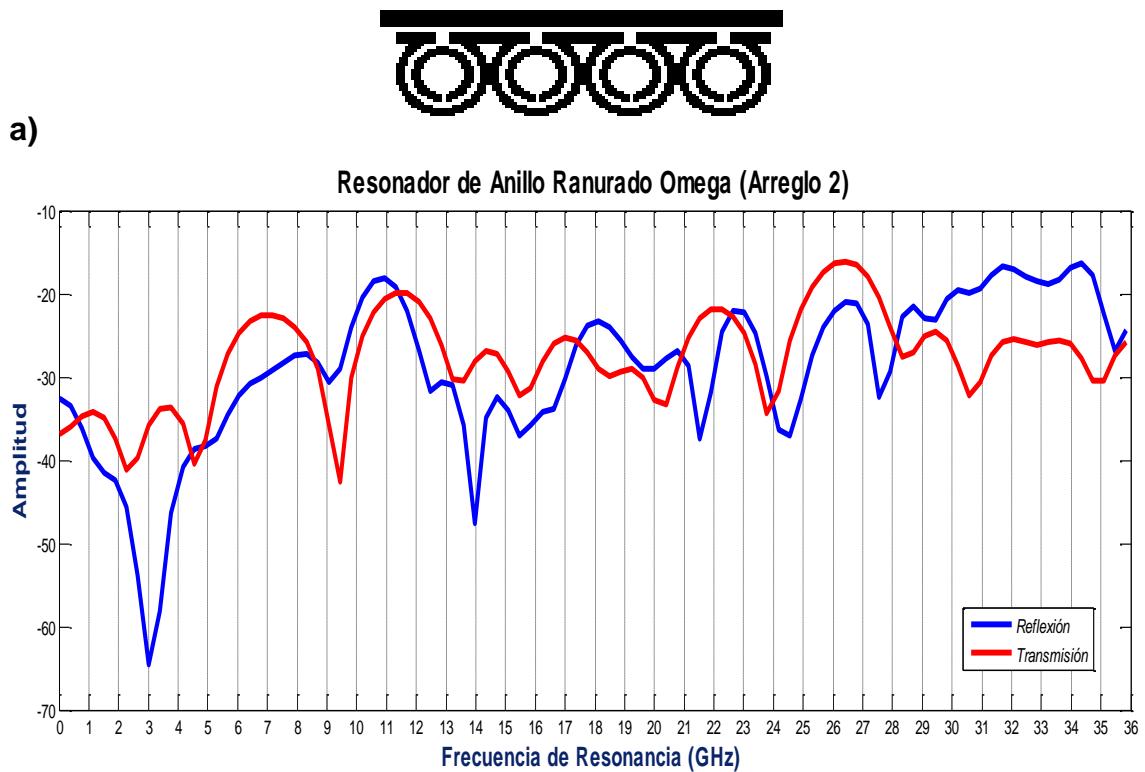


Figura. 58. Arreglo 1 de Resonador de Anillo Ranurado Omega

6.2.2 Arreglo 2

En la figura 59 a) se presenta el arreglo empleado, conformado por cuatro RAR omega alineados horizontalmente pero en esta ocasión no existe un espacio entre ellos sino que están unidos uno con otro.

La figura 59 b) muestra la respuesta para este arreglo, la cual tiene una frecuencia de mayor amplitud a los 3GHz pero en esta ocasión en la reflexión.



b)

Figura. 59. Arreglo 2 de Resonador de Anillo Ranurado Omega

6.2.3 Arreglo 3

El tercer arreglo está conformado por cuatro RAR omega intercalados, como se muestra en la figura 60 a).

Para este arreglo se tiene una frecuencia de mayor amplitud a los 8GHz en la transmisión como se ilustra en la figura 60 b).

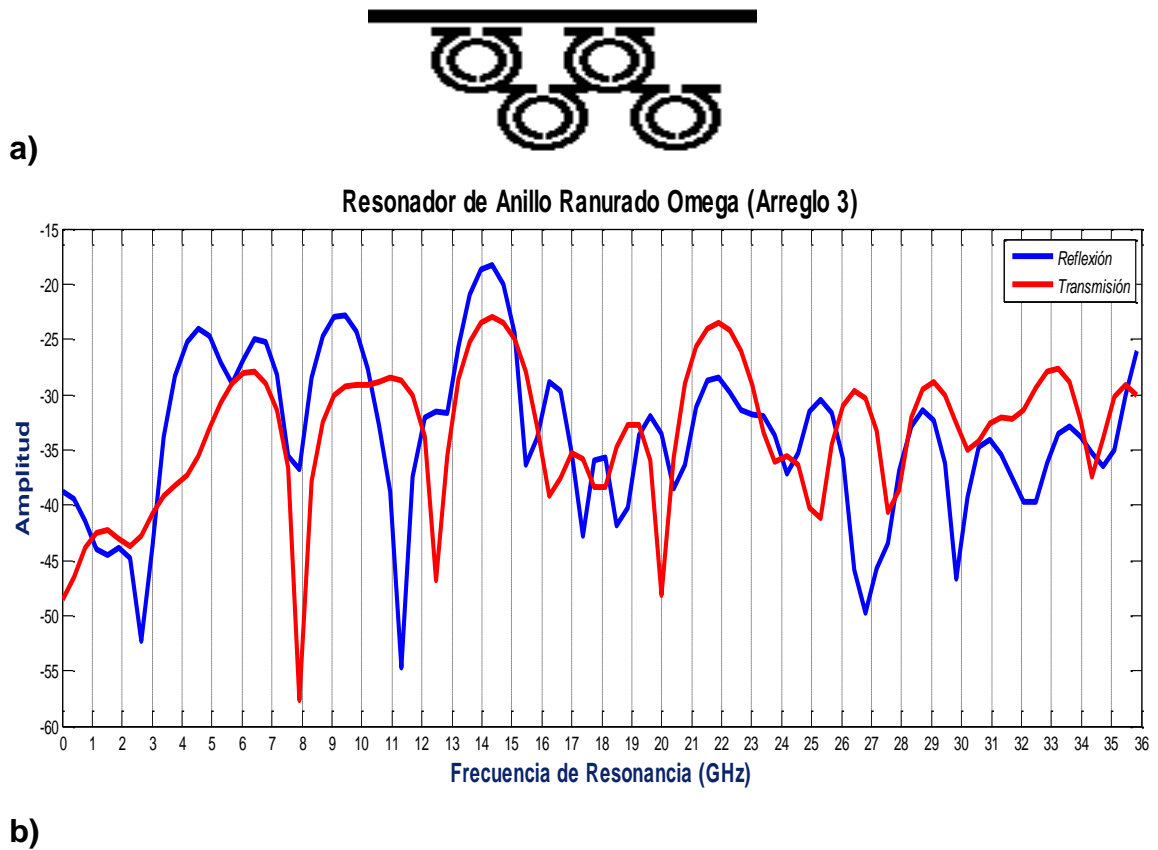


Figura. 60. Arreglo 3 de Resonador de Anillo Ranurado Omega

6.2.4 Arreglo 4

El último arreglo que se presenta está formado por cuatro RAR alineados horizontalmente con una separación de 0.265mm entre ellos; este arreglo se ha colocado dentro de una guía de onda como se ilustra en la figura 61 a).

En la figura 61 b) se muestra el comportamiento obtenido con este arreglo, el cual tiene una mayor amplitud en las frecuencias de transmisión.

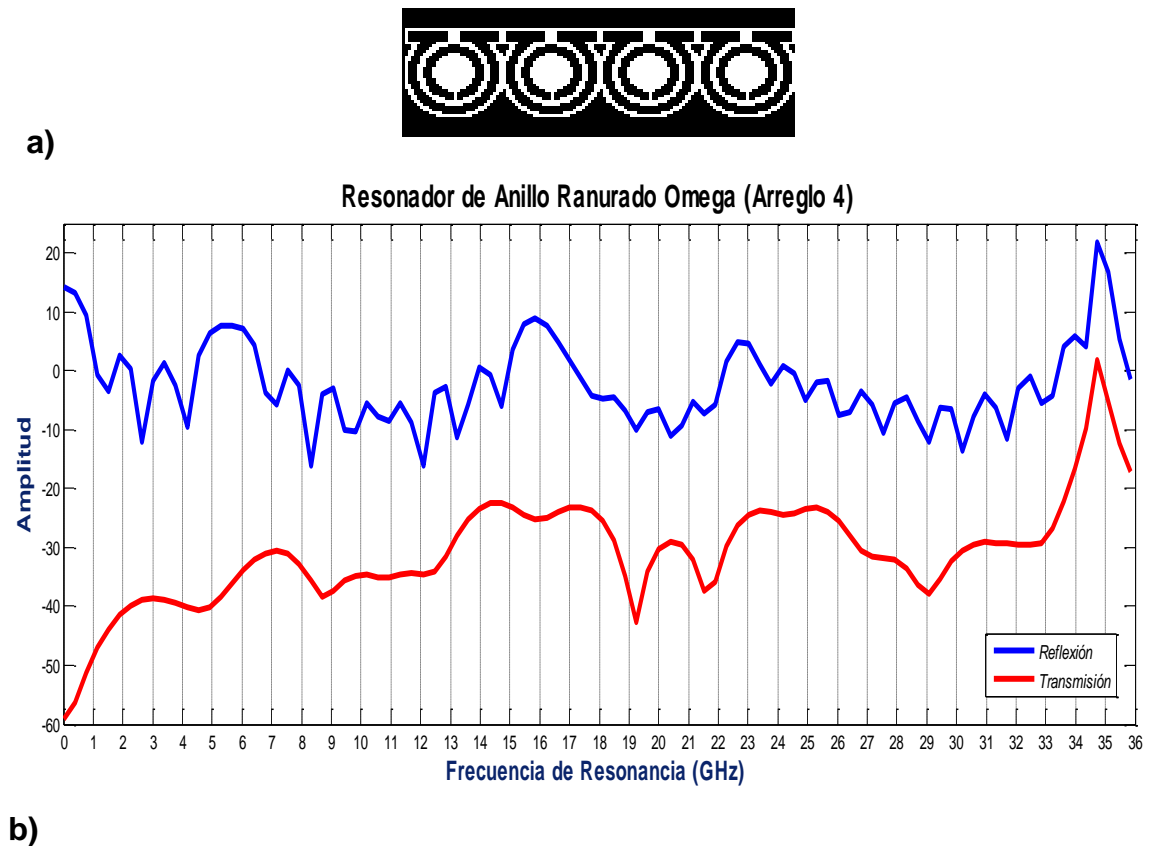


Figura. 61. Arreglo 4 de Resonador de Anillo Ranurado Omega

6.3 Conclusión

Al realizar diferentes arreglos con los Resonadores de Anillo Ranurado se puede observar los cambios en la respuesta obtenidos, lo cual es distinto dependiendo de la cantidad de RAR empleados así como la geometría, el tamaño y los materiales empleados.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

- 1 El descubrimiento y desarrollo de los metamateriales ha ido evolucionando gracias a las aportaciones de diversos científicos visionarios. Este trabajo de tesis aborda los inicios y los trabajos realizados a través del tiempo con los metamateriales.
- 2 Al conocer los principios matemáticos empleados para los metamateriales, será posible comprobar las propiedades que caracterizan a estos.
- 3 Al emplear los metamateriales con distintas geometrías de Resonadores de Anillo Ranurado podemos observar la respuesta obtenida para cada una de ellas, empleando distintos materiales y tamaños para su comparación y comprensión.
- 4 Así mismo se realiza un arreglo con Resonadores de Anillo Ranurado Omega con lo que se puede observar los cambios en la respuesta al utilizar distintos arreglos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tao Chen, Suyan Li, Hui Sun, "Metamaterials Application in Sensing", ISSN 1424-8220, feb 2012.
- [2] Sistema de Observación y Prospectiva Tecnológica, "Los Metamateriales y sus Aplicaciones en Defensa", mar 2011.
- [3] Manuel J. Freire, Ricardo Marques, Lukas Jelinek, "Experimental Demonstration of a $\mu = -1$ metamaterial lens for magnetic resonance imaging", University of Seville.
- [4] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Vol. 10 No. 4, jan-feb 1968.
- [5] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena", Vol. 47 No. 11, nov 1999.
- [6] J. B. Pendry, "Negative Refractive Makes a Perfect Lens", Vol. 85 No. 18, oct 2000.
- [7] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Shultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", Vol. 292, apr 2001.
- [8] D. R. Smith, D. Schuring, J. B. Pendry, "Negative Refraction of Modulated Electromagnetic Waves", Vol. 81 No. 15, oct 2002.
- [9] Calus Jeppesen, "Metamaterial for Sensing Applications", Thesis, 14 Dec 2010.
- [10] He-Xiu, Guang-Ming Wang, Mei-Qing Qi and Zhi-Ming Xu, "A metamaterial antenna with frequency-scanning omnidirectional radiation patterns", Appl. Phys. Lett. 101, 173501 (2012), Oct 2012.
- [11] Luigi La Spada, Filiberto Bilotti, Lucio Vegni, "Metamaterial biosensor for cancer detection", 2011 IEEE; Oct. 2011.

- [12] E. M. Purcell, H. C. Torrey, R. V. Pound, "Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid", Phys. Rev. 69 (1946) 37, 24 Dec. 1945
- [13] F. Bloch, "Nuclear Induction", Phys. Rev. Vol 70 Num 7 y 8, 1 y 15 de Oct 1946
- [14] Vidyalakshmi.M.R and Dr.S.Raghavan, "Comparison of Optimization Techniques for Square Split Ring Resonator", *Vol.5 No.5, Sept 2010*
- [15] Gómez Tejedor, José Antonio; Olmos Sanchis, Juan José (1999). *Cuestiones y Problemas de Electromagnetismo y Semiconductores*. Universidad Politécnica de Valencia - Servicio de Publicaciones.
- [16] Hee-Joo Lee, Jung-Hyun Lee, Hui-Sung Moon, Ik-Soon Jang, Jong-Soon Choi, Jong-Gwan Yook, Hyo-Il Jung, "A planar split ring resonator based microwave biosensor for label free detection of biomolecules", Sensors and Actuators B 169 (2012) 26-31, 15 Jan 2012.
- [17] Victor Hugo Morales Trujillo, "Metamateriales: Introducción a sus propiedades y aplicaciones", Guatemala, Sep 2009.
- [18] Hangfei Tang, Quanwen Hou, Yahong Liu, Xiaopeng Zhao, "A High Gain Omnidirectional Antenna Using Negative Permeability Metamaterial", Art ID 575062, may 2013.
- [19] Rustam Mustafa, "Ring Resonator with single gap for Measurement of Dielectric Constants of Materials", University of Gävle, June 2013.
- [20] Vidyalakshmi.M.R, Rekha.B and P.H.Rao, "Stopband Characteristics of Complementary Triangular Split Ring Resonator Loaded Microstrip Line", 2011 IEEE, Dec. 2011.
- [21] Sumanta Bose, M. Ramaraj, Dr. S. Raghavan, Swadhyaya Kumar; "Mathematical Modeling, Equivalent Circuit Analysis and Genetic Algorithm Optimization of an N-Sided Regular Polygon Split Ring Resonator (NRPSRR)"; 2nd International Conference on Communication, Computing & Security; 2012.
- [22] Kane S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media", Vol. AP-14 No.3, May 1966.
- [23] William H. Hayt, Jr. & John A. Buck, Teoría Electromagnética, Mc Graw Hill, Séptima Edición. 552-553.

[24] Hasgall PA, Neufeld E, Gosselin MC, Klingeböck A, Kuster N, "IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues," Version 2.5, August 1st, 2014. www.itis.ethz.ch/database